

ELEKTRİK ŞEBEKELERİNDE AŞIRI GERİLİMLERE KARŞI KORUMA TEKNİĞİ

Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ Doç. Dr. Behçet KOCAMAN



ELEKTRİK ŞEBEKELERİNDE AŞIRI GERİLİMLERE KARŞI KORUMA TEKNİĞİ



Prof. Dr. Sabir RŐSTEMLİ

Doç. Dr. Behçet KOCAMAN



Copyright © 2022 by iksad publishing house

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or transmitted in any form or by

any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social

Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TURKEY TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

Iksad Publications – 2022©

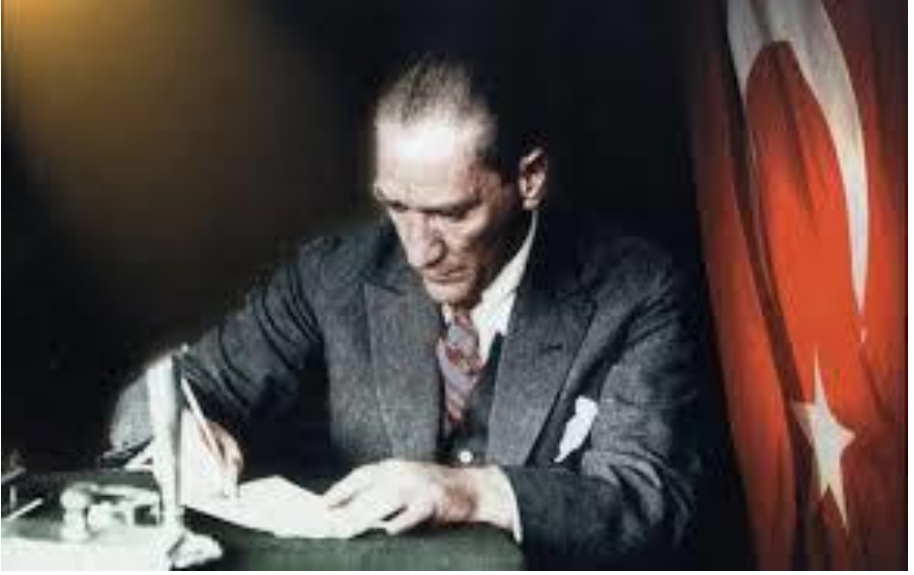
ISBN: 978-625-6380-38-7

Cover Design: İbrahim KAYA

December/ 2022

Ankara / Turkey

Size = 16 x 24 cm



“Çalışmadan, öğrenmeden, yorulmadan rahat yaşamamanın yollarını aramayı alışkanlık haline getirmiş milletler, evvela haysiyetlerini, sonra hürriyetlerini ve daha sonra da geleceklerini kaybetmeye mahkûmdurlar.”

Mustafa Kemal ATATÜRK

Bu kitabı, daima sevgi ve destekleri ile yanımda olan sevgili eşim Kamile RÜSTEMLİ'ye, kızım Nermin RÜSTEMLİ'ye ve oğlum Ali Cengiz RÜSTEMLİ'ye armağan ediyorum.

Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ

Kitabın hazırlanması aşamasında bana duydukları güven, verdikleri sevgi ve sabır ile yanımda olan; aileme, eşime ve çocuklarıma sonsuz teşekkür ederim.

Doç. Dr. Behçet KOCAMAN

ÖNSÖZ

Genellikle mikrosaniye gibi çok kısa sürelerde oluşan şebekenin normal (nominal) gerilim değerini aşarak izolasyon için tehlikeli boyuta ulaşması durumundaki gerilim, aşırı gerilim olarak bilinmektedir. Enerji iletim sistemlerindeki faz iletkenlerine, elektrik direklerine veya koruma iletkenleri üzerine doğrudan doğruya yıldırım düşmesi sonucunda aşırı gerilimler oluşur. Bununla birlikte elektromanyetik etkileşim nedeniyle de aşırı gerilimler oluşmaktadır. Oluşan kısa süreli aşırı gerilim dalgası ile izolatörler kırılmakta ve transformatör izolasyonları bozulmaktadır. Enerji iletim sistemlerinde her an aşırı gerilimlerin oluşma riski bulunması nedeniyle, sistemleri bu aşırı gerilimlerden korumak için belli tekniklerle aşırı gerilim koruması yapılması gerekmektedir. Elektrik şebekelerinde aşırı gerilimlere karşı koruma tekniğinin amacı; yüksek gerilimli enerji iletim hatlarının, şalt sahalarının, transformatörlerin ve diğer elemanların aşırı gerilimlere karşı koruma tekniğini öğrenmek ve bu aşırı gerilimlerin oluşma sebeplerini ortaya koymaktır. Bu eser; ilgili birimlerin; elektrik elektronik mühendisliği, elektrik mühendisliği bölümleri ile, meslek yüksekokulların ilgili bölümlerinde okuyan öğrenciler için elektrik şebekelerinde aşırı gerilimlere karşı koruma tekniği bilgisini kazandırabilecek temel konulardan oluşmaktadır.

Kitap, Elektrik/Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde okutulmakta olan Yüksek Gerilim Tekniği-2 dersi kapsamında anlatılan konular ile benzer amaçlı derslerin içerikleri baz alınarak hazırlanmıştır. Kitapta, enerji iletim sistemlerinde, yürüyen dalga

biçiminde yayılan ve tüm cihazlarda zorlanmalara neden olan aşırı gerilimlerin belirli karakteristik özellikleri tanımlanmıştır. Ayrıca aşırı gerilimlere karşı koruma teknikleri olan peterson bobini, ark boynuzu, koruma hattı, parafudr ve paratoner gibi teknikler ayrıntılı olarak incelenmiştir. Kitabın, yüksek gerilim ve koruma teknikleri konularında çalışma yapan mühendis ve akademisyenlere faydalı olmasını ümit ederiz.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	iii
GİRİŞ	7
BÖLÜM 1	10
YÜRÜYEN DALGALAR	10
1.1. Enerji İletim Hatlarında Yürüyen Dalgaların Yayılma Hızı....	10
1.2. Yürüyen Dalgaların Enerjisi ve Güçleri	14
1.3. İlerleyen (Yürüyen) Dalgaların Zayıflaması	16
1.4. Yürüyen dalgaların Yansıma ve Kırılması	19
1.4.1. Sonu R direnci ile bağlı olan bir hat durumu	23
1.4.2. Sonu L endüktansı ile bağlı olan bir hat durumu	30
1.4.3. Sonu C kapasite ile bağlı olan bir hat durumu	35
1.4.4. Bir Hattan Bir Kabloya Geçiş Durumu.....	41
1.5. Yürüyen Dalgaların Şalt Sahasına Gelmesi Durumu	45
1.6. Elektromanyetik Dalgasının Kapasiteden Yan, Endüktanstan İşe Doğrudan Geçmesi.....	48
1.7. Yürüyen Dalgaların Çok Katlı Yansıması.....	53
1.8. Yürüyen Gerilim Dalgasının Salınım Devresine Gelmesi.....	57
1.9. Elektromanyetik Dalgaların Çok Hatlı Sistemde Yayılması ...	59
BÖLÜM 2	63
YILDIRIM BOŞALMASI	63
2.1. Yıldırım Boşalmasının Yaşanması	63
2.2. Yıldırım Akımının Etkileri	74
BÖLÜM 3	76
DIŞ AŞIRI GERİLİMLER	76
3.1. Faz Hattına Yıldırımın Düşmesi.....	76
3.2. Direğe Yıldırımın Düşmesi	78
3.3. Koruma Hattına Yıldırımın Düşmesi	80
3.4. Tesirle Elektriklenme Suretiyle Oluşan Aşırı Gerilimler	82

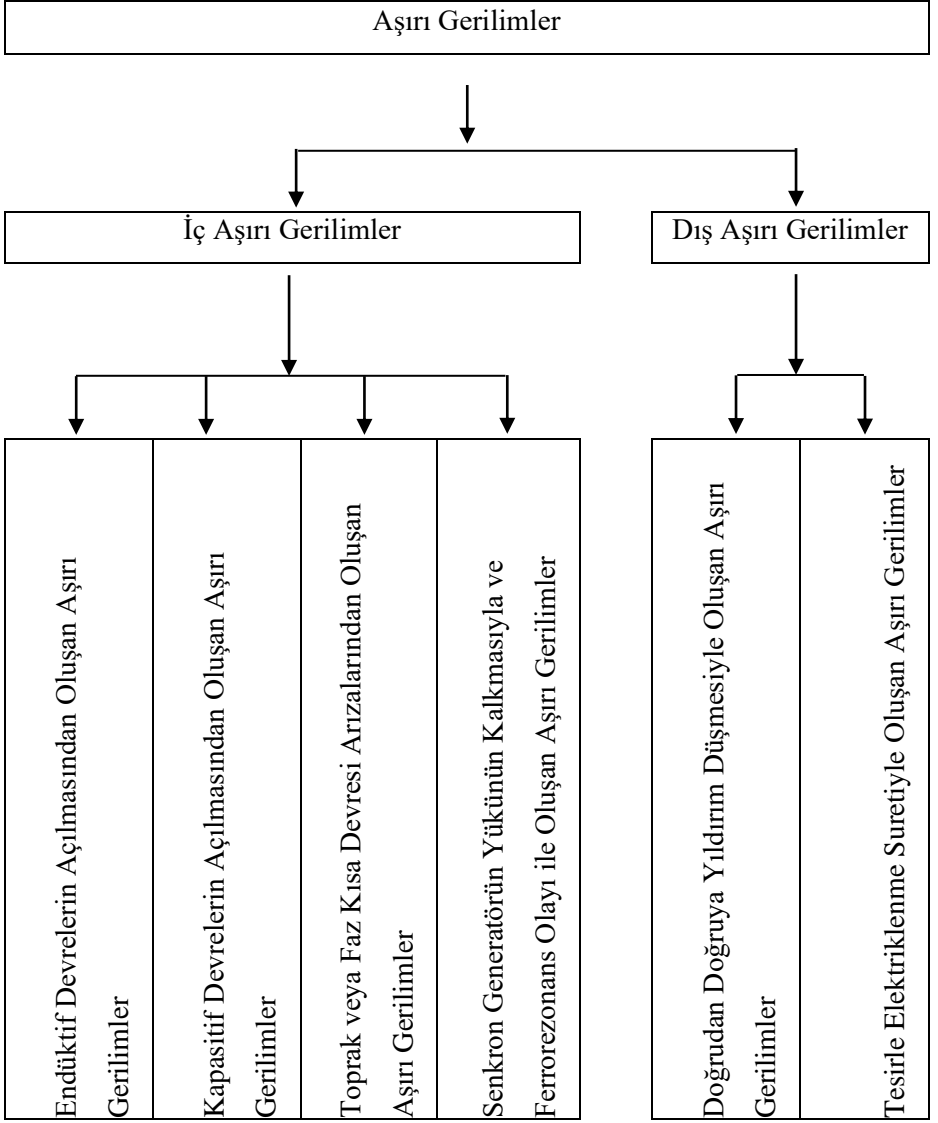
BÖLÜM 4.....	85
İÇ AŞIRI GERİLİMLER.....	85
4.1. Endüktif Devrelerin Açılmasından Oluşan Aşırı Gerilimler ...	85
4.2. Kapasitif Devrelerin Açılmasından Oluşan Aşırı Gerilimler ..	87
4.3. Senkron Genaratörün Yükünün Kalkmasından Oluşan Aşırı Gerilimler.....	91
4.4. Bir Fazın Toprakla Temasından Oluşan Aşırı Gerilimler	93
4.5. Ferrerezonans Olayından Oluşan Aşırı Gerilimler.....	95
BÖLÜM 5.....	98
AŞIRI GERİLİMLERE KARŞI KORUMA	98
5.1. Peterson Bobini Kullanma Yöntemi.....	98
5.2. Ark Boynuzu Kullanma Yöntemi.....	100
5.3. Koruma Hattı (Koruma İletkeni)	103
5.4. Parafudrlar	108
5.4.1 Değişken Dirençli Parafudrlar	109
5.4.2. Metal Oksit Parafudrlar.....	115
5.5. Paratonerler.....	117
5.5.1. Aktif Paratonerler.....	117
5.5.1.1. Radyoaktif Paratonerler.....	118
5.5.1.2. Piezoelektrik Paratonerler	120
5.5.1.3. Elektrostatik Paratonerler	121
5.5.2. Pasif Paratonerler	122
5.5.2.1. Faraday Kafesi.....	123
5.5.2.2. Franklin Çubuğu.....	124
KAYNAKLAR.....	130

GİRİŞ

Elektrik şebekelerinde, yüksek gerilimli hava hatları ve bunlara bağlı generatör, transformatör, yüksek gerilimli yük kesicileri vb. işletme cihazlarında oluşan arızaların birden fazla sebepleri vardır. Fakat bu sebeplerin en önemlisi aşırı gerilimlerdir. Gerilimin normal (nominal) değerini aşarak izolasyon (yalıtım) düzeyi için tehlikeli olan değere yükselmesine aşırı gerilim denilir. Aşırı gerilimleri, iç ve dış aşırı gerilimler olmak üzere iki şekilde incelemek mümkündür. Devre açma ve kapamada, toprak ve faz kısa devrelerinde ve rezonans olaylarında oluşan aşırı gerilimler iç aşırı gerilimlerdir. Bu gerilimlerin genliği, işletme gerilimine bağlıdır. Dış aşırı gerilimler ise atmosferik etkilerden oluşmakta ve genliği işletme gerilimine bağlı değildir.

Aşırı gerilimlerden dolayı enerji iletim hatlarında toprak veya faz kısa devreleri, transformatörün sargılarında ise sarım kısa devreleri oluşmaktadır. En büyük atmosferik aşırı gerilimleri yıldırımın enerji iletim hattına veya şalt sahasına düşmesi sonucunda oluşur. Yıldırımın enerji iletim hattının yakınlığında toprağa düşmesi durumunda tesirle elektriklenme suretiyle aşırı gerilim oluşur. Yıldırımın faz hattına düşmesi durumunda, yıldırımın düştüğü noktadan her iki yöne doğru ilerleyen (yürüyen) dalga oluşur.

Aşırı gerilimleri karakterize eden blok diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Aşırı gerilimleri karakterize eden blok diyagramı

Aşırı gerilimlere karşı koruma denilince, aşırı gerilimlerin meydana gelmesini önleyen önlemler veya koruma aygıtları anlaşılır. Aygıtlara yüksek gerilim parafudrları, koruma elektrotları vb. dahildir. Önlemler, izolasyon boyutlandırılması ve koordinasyonu ile ilgilidir.

İzolasyon koordinasyonu, aşırı gerilimleri sebep oldukları zararlardan sakınmak amacı ile, çeŐitli izolasyon düzeylerinin ve koruma düzeylerinin karşılıklı olarak uyum halinde olmasıdır.

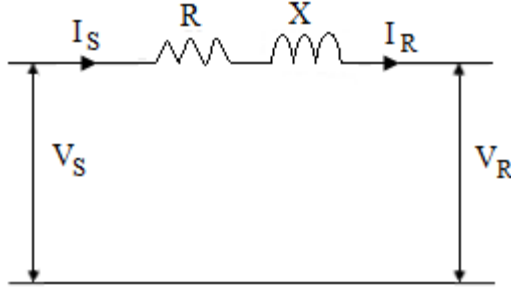
BÖLÜM 1

YÜRÜYEN DALGALAR

1.1. Enerji İletim Hatlarında Yürüyen Dalgaların Yayılma Hızı

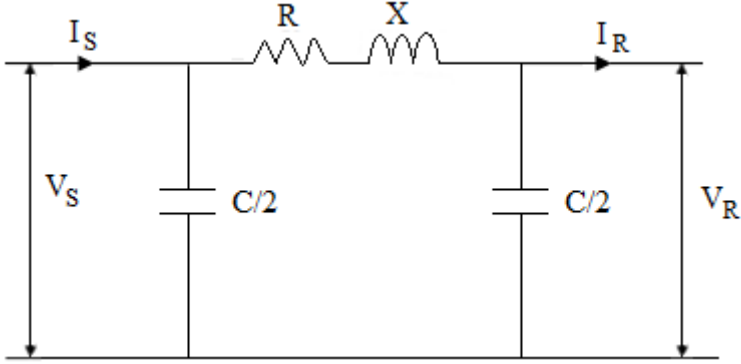
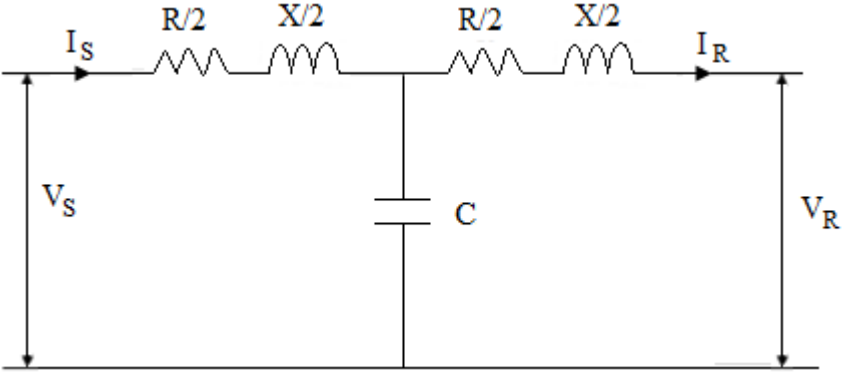
Günlük yaşantımızda enerji iletim hatları, tamamen enterkonnekte yapıya sahip olup bunları birbirinden farklı düşünmemek gerekir. Ancak en genel olarak enerji iletim hatları, “kısa”, “orta” ve “uzun” enerji iletim hatları olarak üç şekilde açıklanabilir.

Uzunluğu 80 km’ye kadar olan enerji iletim hatları “kısa enerji iletim hattı” olarak tanımlanır. Hesaplarda bu hatların kapasitesi ve kaçak geçirgenliği ihmal edilir ve Şekil 1.1’de gösterildiği gibi enerji iletim hattı seri bir empedans ile karakterize edilir.



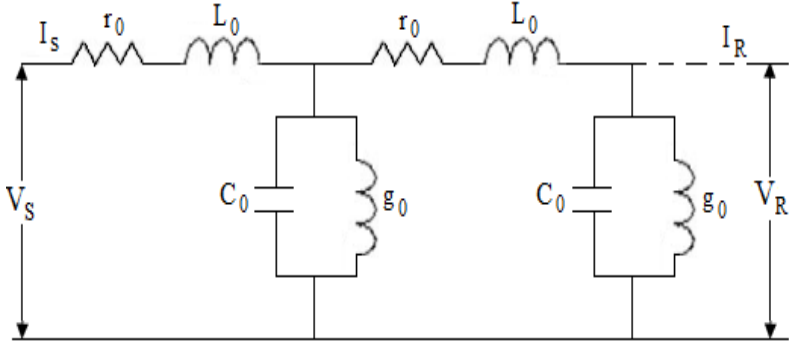
Şekil 1.1. Kısa bir enerji iletim hattının eşdeğer devresi

Uzunluğu 80 km’den 240 km’ye kadar olan enerji iletim hatları “orta enerji iletim hattı” sınıfına girerler. Hesaplarda bu hatların kaçak geçirgenliği ihmal edilir, kapasitesi ise ihmal edilemez ve hat kapasitesinin hattın her iki ucunda (nominal π devresi) toplandığı (Şekil 1. 2) veya hattın tam ortasında (nominal T devresi) toplanmış olduğu (Şekil 1.3) varsayımları kullanılabilir.

Şekil 1.2. Nominal π eşdeğer devresi (Çakır.1989)

Şekil 1.3. Nominal T eşdeğer devresi (Çakır.1989)

Uzunluğu 240 km'den fazla olan enerji iletim hatları, “uzun enerji iletim hatları” sınıfına girerler. Bu tip hatlarda hattın omik direnci, reaktansı, kapasitesi ve kaçak geçirgenliği gerçekte olduğu gibi hat boyunca homojen dağıldığı kabul edilir. Üç fazlı bir enerji iletim hattının tek faz ve nötr bağlantısından oluşan gerçek eşdeğer devresi Şekil 1.4'te verilmiştir.



Şekil 1.4. Uzun enerji iletim hattının eşdeğer devresi

Burada;

r_0 : Ω/km olarak iletkenin birim uzunluktaki alternatif akım (AC) direncini,

L_0 : H/km olarak iletkenin birim uzunluktaki self endüktansını,

C_0 : F/km olarak iletkenin nötre göre birim uzunluktaki kapasitesini,

g_0 : Siemens/km olarak iletkenin nötre göre birim uzunluktaki kaçak geçirgenliğini,

I_S : Amper (A) olarak hat başı faz akımını,

I_R : Amper (A) olarak hat sonu faz akımını,

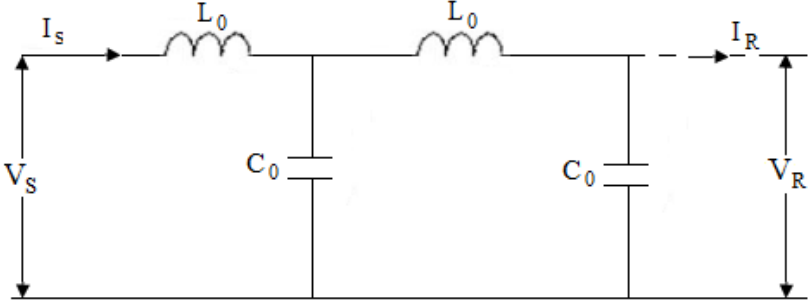
V_S : Volt (V) olarak hat başı faz-nötr gerilimini,

V_R : Volt (V) olarak hat sonu faz-nötr gerilimini, göstermektedir.

Yürüyen dalgaların hatlarda yayılması, Denklem (1.1) ile ifade edilir.

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= L_0 \frac{\partial i}{\partial t} + r_0 i \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= C_0 \frac{\partial u}{\partial t} + g_0 u \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

İşlemlerde kolaylık olsun diye $r_0=0$ ve $g_0=0$ kabul edelim. Yani kayıpsız enerji iletim hatlarını inceleyelim. Kayıpsız enerji iletim hatları durumu için eşdeğer devre, Şekil 1.5'te gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Eşdeğer devre

Şekil 1.5'teki eşdeğer devre için (1.1) denklemleri;

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

şeklinde yazılır.

Bu denklemlerin genel çözümü,

$$\left. \begin{aligned} u &= u_i + u_y = f_1(x-Vt) + f_2(x+Vt) \\ i &= i_i + i_y = \frac{1}{Z} f_1(x-Vt) - \frac{1}{Z} f_2(x+Vt) \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

şeklindedir.

Burada;

u_i, i_i – ilerleyen dalgayı,

u_y, i_y – yansıyan dalgayı,

Z- hattın karakteristik empedansını,

V- yürüyen dalganın yayılma hızını, göstermektedir.

Hattın karakteristik empedansı için,

$$Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (1.4)$$

yazılabilir.

Genel olarak hava hatlarında hattın karakteristik empedansı $Z = 300-900 \Omega$; kablolarda ise $Z_k = 40-120 \Omega$ arasında değişmektedir.

Yürüyen dalgaların yayılma hızı için,

$$V = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{veya} \quad V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (1.5)$$

yazılabilir.

Hava hatları için $\epsilon = 1$ ve $\mu = 1$ olduğundan $V = C$ denklemi yazılabilir. Kablolar için ise $\epsilon = 4$ ve $\mu = 1$ olduğundan $V = \frac{C}{2}$ denklemi yazılabilir. Buradan da görüleceği gibi hava hatlarında yürüyen dalgaların yayılma hızı ışık hızına, kablolarda ise ışık hızının yarısına eşittir.

1.2. Yürüyen Dalgaların Enerjisi ve Güçleri

Uzunluğu “l” olan bir hatta yürüyen dalga halinde elektrik alanında biriken enerji,

$$W_c = \frac{1}{2} (C_{0.1}) u^2 \quad (1.6)$$

Manyetik alanda biriken enerji ise,

$$W_L = \frac{1}{2} (L_{0.1}) i^2 \quad (1.7)$$

şeklinde olur.

Eğer i yerine,

$$i = \frac{u}{Z} = \frac{u}{\sqrt{L_0/C_0}} \quad (1.8)$$

i^2 yerine de,

$$i^2 = \frac{u^2}{L_0/C_0} \quad (1.9)$$

olduğunu kabul edersek bu durumda manyetik alanda biriken W_L enerjisi için,

$$W_L = \frac{1}{2} (L_{0.1}) \frac{u^2}{L_0} C_0 = \frac{1}{2} (C_{0.1}) u^2 = W_c \quad (1.10)$$

yazılabilir.

Dolayısıyla toplam enerji,

$$W = W_c + W_L = Li^2 = Cu^2 \quad (1.11)$$

Güç ise,

$$P = u.i = \frac{u^2}{Z} = Z.i^2 \quad (1.12)$$

şeklinde olur.

Örnek 1.1: Uzunluğu $l = 3$ km, karakteristik empedansı $Z = 500 \Omega$ olan bir hava hattında $u = 100$ kV'luk bir yürüyen gerilim dalgası meydana gelmişse, dalanın enerjisini ve gücünü bulunuz.

Çözüm 1.1: Hat, hava hattı olduğu için hava hatlarında yürüyen dalgaların yayılma hızı ışık hızına eşittir. Yani $V = 300000$ km/s'dir.

$i = \frac{u}{Z} = \frac{100 \cdot 10^3}{500} = 200$ A olur. Bu durumda hattın 200 A'lık bir yürüyen

akım dalgası geçmektedir. Bu dalga'nın gücü;

$P = u \cdot i = 100 \cdot 10^3 \cdot 200 = 20$ MW olur.

$t = \frac{l}{v} = \frac{3}{3 \cdot 10^5} = 10$ μ s olduğundan yürüyen dalga'nın enerjisi;

$W = P \cdot t = 20 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 200$ W.s = 200 J olur.

Buradan da görüleceği üzere, yürüyen dalga'nın gücü çok büyük olduğu halde enerjisi çok küçüktür.

1.3. İlerleyen (Yürüyen) Dalgaların Zayıflaması

Yüksek gerilimli enerji iletim hattı için birim uzunluğundaki direnci r ise, dx uzunluğundaki hattın direnci $r \cdot dx$ olur. İlerleyen (Yürüyen) dalga'nın dx mesafesinde ilerlemesi durumunda yürüyen dalga'nın gücündeki $-dP$ azalması, dx hattında oluşan Joule kaybına eşit olduğundan,

$$-dP = r \cdot dx \cdot i^2 \quad (1.13)$$

şeklinde olur.

Yürüyen dalganın gücü,

$$P = u.i = Z.i^2 \quad (1.14)$$

Şeklinde olduğundan dP için

$$dP = 2.Z.i di \quad (1.15)$$

elde edilir.

Eğer Denklem (1.15) ifadesini (1.13) ifadesinde dikkate alacak olursak, bu durumda;

$$-2Z.i di = rdx i^2 \quad (1.16)$$

elde edilir. Denklem (1.16) ifadesi düzenlenirse,

$$\frac{di}{dx} + \frac{r}{2Z} i = 0 \quad (1.17)$$

elde edilir.

Eğer $\alpha = \frac{r}{2Z}$ kabul edersek,

$$\frac{di}{dx} + \alpha i = 0 \quad (1.18)$$

elde edilir. Denklem (1.18) düzenlenirse,

$$\frac{di}{i} = -\alpha dx \quad (1.19)$$

elde edilir. Denklem (1.19) ifadesinden integral alınırsa,

$$\ln \frac{i}{i_0} = -\alpha x \quad (1.20)$$

elde edilir. Denklem (1.20) ifadesinden $\frac{i}{i_0}$ için,

$$\frac{i}{i_0} = e^{-\alpha x} \quad (1.21)$$

yazılabilir. Buradan da “i” için,

$$i = i_0 e^{-\alpha x} \quad (1.22)$$

elde edilir.

Gerilimin, $u = Zi$ olduğu dikkate alındığında,

$$u = Z i_0 e^{-\alpha x} = u_0 e^{-\alpha x} \quad (1.23)$$

denklemi elde edilir. Burada i_0 ve u_0 ; akım ve gerilimin başlangıç anındaki değerlerini gösterir. Eğer $X = V.t$ olduğunu dikkate alınırsa akım ve gerilim için,

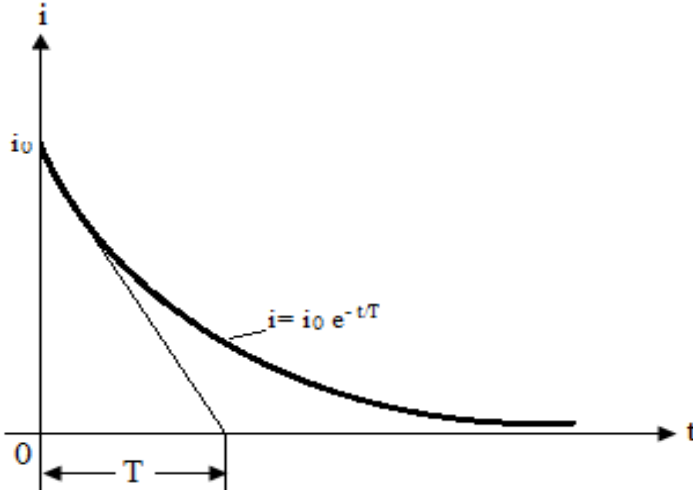
$$i = i_0 e^{-(r/2Z) v.t} = i_0 e^{-t/T} \quad (1.24)$$

$$u = u_0 e^{-(r/2Z) v.t} = u_0 e^{-t/T} \quad (1.25)$$

yazılabilir. Burada,

$$T = \frac{2Z}{rV} = 2\sqrt{L/C} \cdot \frac{\sqrt{LC}}{r} = \frac{2L}{r} \quad (1.26)$$

şeklindedir. Şekil 1.6’da $i = i_0 e^{-t/T}$ değişim eğrisi verilmiştir.

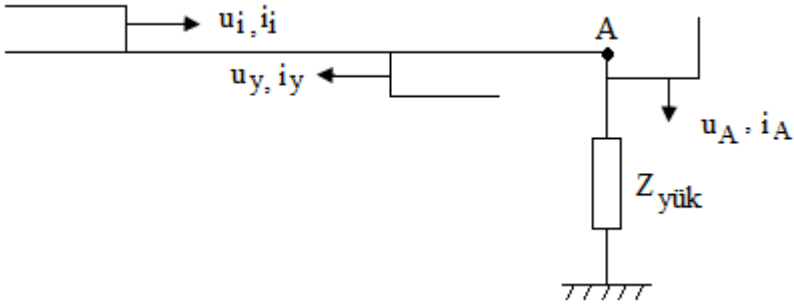


Şekil 1.6. Değişim eğrisi (Özkaya.1988)

1.4.Yürüyen dalgaların Yansıma ve Kırılması

Yürüyen bir gerilim dalgası “sınır” veya “ yansıma-kırılma” (geçirme) noktalarında yansımaya ve kırılmaya uğramaktadır. Bu durumda, hat üzerinde yeni dalgalar oluşur. “sınır” veya “yansıma-kırılma” (geçirme) noktası karakteristik empedansları farklı olan elemanların birleşme noktasına denir.

Şimdi karakteristik empedansı Z olan bir enerji iletim hattı ile yürüyen dalganın A “sınır” noktasına geldiğini varsayalım. Bu durum Şekil 1.7’de verilmiştir.



Şekil 1.7. Yürüyen dalganın A “sınır” noktasına gelmesi durumu (Тиняков.1982)

Burada,

u_i, i_i – ilerleyen gerilim ve akım dalgasını,

u_y, i_y – yansıyan gerilim ve akım dalgasını,

u_A, i_A – kırılan gerilim ve akım dalgasını,

göstermektedir.

A sınır noktası için,

$$u_A = u_i + u_y \quad (1.27)$$

$$i_A = i_i + i_y \quad (1.28)$$

yazılabilir. İlerleyen ve yansıyan akım dalgaları için,

$$i_i = \frac{u_i}{Z} ; i_y = -\frac{u_y}{Z} \quad (1.29)$$

yazılabilir.

Denklem (1.29) ifadesi Denklem (1.28) ifadesinde yerine yazıldığında,

$$i_A = \frac{u_i}{Z} - \frac{u_y}{Z} \quad (1.30)$$

elde edilir. Denklem (1.30) ifadesinin her iki tarafı Z ile çarpılırsa,

$$i_A Z = u_i - u_y \quad (1.31)$$

elde edilir. Denklem (1.27) ifadesinden u_y için,

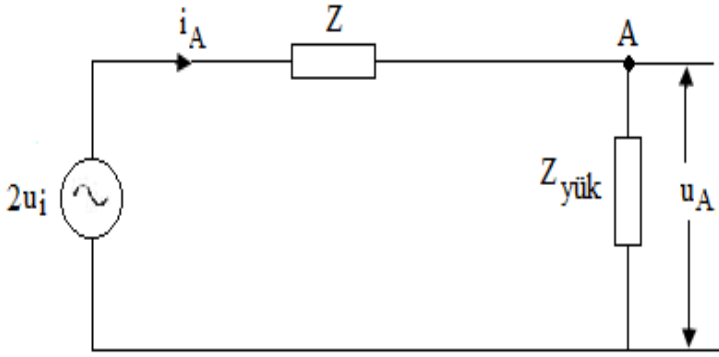
$$u_y = u_A - u_i \quad (1.32)$$

yazılabilir. Denklem (1.32) ifadesi Denklem (1.31) ifadesinde dikkate alınır,

$$i_A Z = 2u_i - u_A \quad (1.33)$$

elde edilir.

i_A ve u_A değerlerinin hesaplanması için $2u_i$ ve iç direnci Z olan bir eşdeğer üreteç kullanılabilir. Böyle bir eşdeğer üreteç devresi Şekil 1.8'de gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Eşdeğer üreteç devresi (Тиняков.1982)

Böylece Denklem (1.33) ifadesine uygun bir eşdeğer şeması kullanılmış olur. Bu tür geçişe Peterson kuralı denilir. Şekil 1.8'den u_A için,

$$u_A = Z_{yük} \cdot i_A = Z_{yük} \cdot \frac{2u_i}{Z + Z_{yük}} = \frac{2Z_{yük}}{Z + Z_{yük}} \cdot u_i \quad (1.34)$$

yazılabilir. Eğer $\beta_u = \frac{2Z_{yük}}{Z + Z_{yük}}$ kabul edersek, bu durumda u_A için,

$$u_A = \beta_u \cdot u_i \quad (1.35)$$

elde edilir.

Burada;

β_u – gerilime göre kırılma katsayısıdır. Kırılma katsayısının $\beta_u = \frac{2Z_{yük}}{Z + Z_{yük}}$ değeri Denklem (1.32) ifadesinde yerine yazılırsa u_y için,

$$u_y = u_A - u_i = \frac{2Z_{yük}}{Z + Z_{yük}} u_i - u_i = \frac{Z_{yük} - Z}{Z + Z_{yük}} u_i \quad (1.36)$$

elde edilir.

Eğer $\alpha_u = \frac{Z_{yük} - Z}{Z + Z_{yük}}$ kabul edilirse, bu durumda u_y için,

$$u_y = \alpha_u \cdot u_i \quad (1.37)$$

elde edilir.

Burada;

α_u – Gerilime göre yansıma katsayısıdır.

Benzer şekilde kırılma ve yansıma katsayılarını akıma göre de elde etmek mümkündür. Denklem (1.36) ifadesini Denklem (1.37) ifadesinde dikkate alınır, i_A için,

$$i_A = \frac{u_i}{Z} - \frac{Z_{yük} - Z}{Z + Z_{yük}} \cdot \frac{u_i}{Z} = \left(1 - \frac{Z_{yük} - Z}{Z + Z_{yük}}\right) \frac{u_i}{Z} \quad (1.38)$$

elde edilir. Denklem (1.38) ifadesi i_A için düzenlenirse,

$$i_A = \frac{2Z}{Z + Z_{yük}} i_i \quad (1.39)$$

elde edilir.

Eğer $\beta_i = \frac{2Z}{Z + Z_{yük}}$ kabul edilirse, bu durumda i_A için,

$$i_A = \beta_i \cdot i_i \quad (1.40)$$

elde edilir.

Burada:

β_i – akıma göre kırılma katsayısıdır.

Denklem (1.28) ifadesinden yansıyan akım i_y için,

$$i_y = i_A - i_i \quad (1.41)$$

yazılabilir.

Denklem (1.39) ifadesini, Denklem (1.41) ifadesinde dikkate alınırsa i_y için,

$$i_y = \frac{2Z}{Z+Z_{yük}} i_i - i_i = \left(\frac{2Z}{Z+Z_{yük}} - 1 \right) i_i \quad (1.42)$$

elde edilir. Denklem (1.42) ifadesi i_y için düzenlenirse,

$$i_y = \frac{Z-Z_{yük}}{Z+Z_{yük}} i_i \quad (1.43)$$

elde edilir.

Eğer $\alpha_i = \frac{Z-Z_{yük}}{Z+Z_{yük}}$ kabul edilirse, bu durumda i_y için,

$$i_y = \alpha_i \cdot i_i \quad (1.44)$$

elde edilir.

Burada;

α_i – akıma göre yansıma katsayısıdır. Denklem (1.34), (1.36), (1.39) ve (1.43) ifadelerinden,

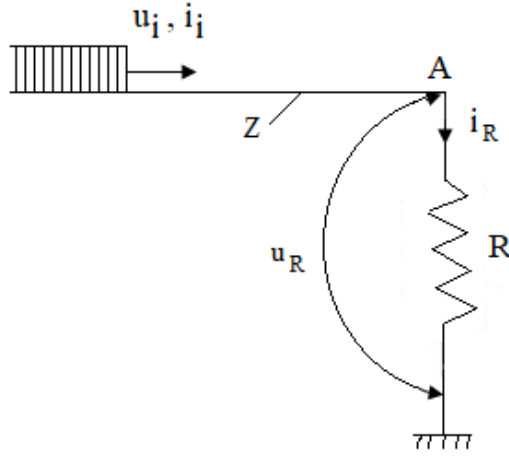
$$\beta_u - \alpha_u = 1 \quad (1.45)$$

$$\beta_i - \alpha_i = 1 \quad (1.46)$$

yazılabilir. Enerji iletim hattı sonuna bağlanan elemana göre hat durumlarını inceleyelim.

1.4.1. Sonu R direnci ile bağlı olan bir hat durumu

Sonu R direnci ile bağlı olan z karakteristik empedansına sahip bir hat ile u_i ilerleyen gerilim dalgasının V hızı ile A sınır noktasına gelmesi Şekil 1.9’da verilmiştir.



Şekil 1.9. Sonu R direnci ile bağlı olan bir hat (Özkaya.1988)

İlerleyen gerilim dalgası (u_i) A sınır noktasına gelince, R direnci nedeniyle yansır ve hat üzerinde bir u_y yansıyan gerilimi oluşur. R direncinden geçen i_R akımının değeri A sınır noktasındaki toplam gerilime bağlıdır. A sınır noktası için,

$$u_A = u_i + u_y = u_R = R \cdot i_R \quad (1.47)$$

$$i_A = i_i + i_y = i_R \quad (1.48)$$

yazılabilir. İlerleyen ve yansıyan akım dalgaları için,

$$i_i = \frac{u_i}{Z} ; i_y = -\frac{u_y}{Z} \quad (1.49)$$

yazılabilir. Denklem (1.49) ifadesi Denklem (1.48) ifadesinde yerine yazıldığında i_A için,

$$i_A = \frac{u_i}{Z} - \frac{u_y}{Z} = i_R \quad (1.50)$$

elde edilir. Denklem (1.50) ifadesinden,

$$u_i - u_y = Z \cdot i_R. \quad (1.51)$$

yazılabilir. Denklem (1.51) ifadesi ile Denklem (1.47) ifadesini taraf tarafa topladıktan sonra i_R için,

$$i_R = 2 \frac{u_i}{R+Z} \quad (1.52)$$

elde edilir. u_R gerilimi için,

$$u_R = R \cdot i_R = 2 \frac{R}{R+Z} u_i \quad (1.53)$$

yazılabilir.

u_y yansıyan gerilimi için,

$$u_y = u_R - u_i = \frac{2R}{R+Z} u_i - u_i = \frac{R-Z}{R+Z} u_i \quad (1.54)$$

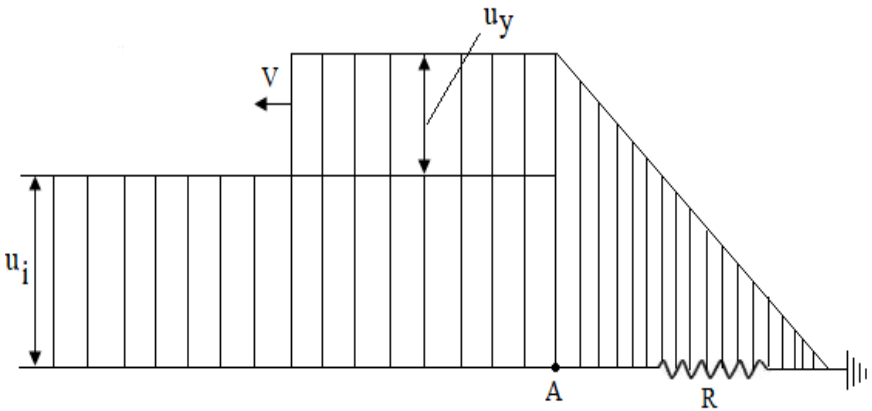
yazılabilir.

i_y yansıyan akımı için,

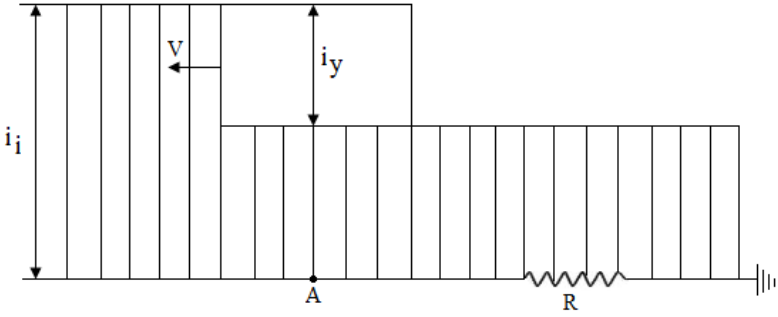
$$i_y = -\frac{u_y}{Z} = -\frac{R-Z}{R+Z} \frac{u_i}{Z} = -\frac{R-Z}{R+Z} i_i \quad (1.55)$$

yazılabilir.

Gerilim ve akım diyagramları Şekil 1.10'da gösterilmiştir.

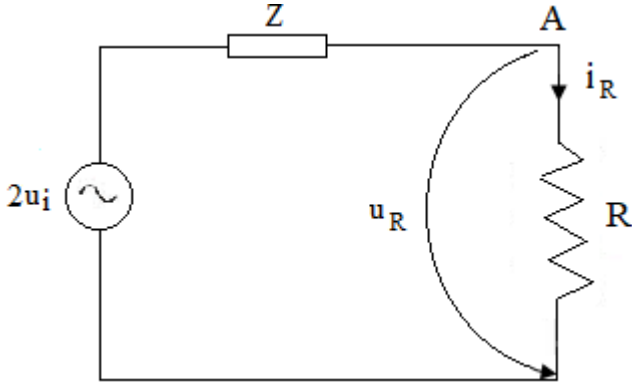


Şekil 1.10 a. Gerilim diyagramı [2]



Şekil 1.10 b. Akım diyagramı (Özkaya.1988)

i_R ve u_e 'nin hesaplanması için emk'i $2u_i$ ve iç direnci z olan bir eşdeğer üreteç kullanılabilir. Bu duruma ilişkin eşdeğer üreteç devresi Şekil 1.11'de verilmiştir.



Şekil 1.11. Eşdeğer üreteç devresi (Özkaya.1988)

Şekil 1.11'de verilen eşdeğer üreteç devresinden i_R ve u_R için,

$$i_R = \frac{2u_i}{Z+R} \quad (1.56)$$

$$u_R = R \cdot i_R = \frac{2R}{R+Z} u_i \quad (1.57)$$

yazılabilir.

R 'ye bağlı olarak aşağıdaki özel durumları inceleyelim.

a) $R = \infty$ olması durumu:

Bu durumda hattın sonu açık olduğundan,

$$\beta_u = \frac{2R}{R+Z} = 2 \text{ olur. Buradan da } u_R, i_R \text{ ve } u_y, \text{ ve } i_y \text{ için,}$$

$$u_R = \beta_u \cdot u_i = 2u_i$$

$$i_R = \frac{2u_i}{Z+R} = 0$$

$$u_y = u_i$$

$$i_y = -i_i$$

olur.

b) $R = 0$ olması durumu:

Bu durumda hattın sonunda kısa devre olduğundan,

$$\beta_u = \frac{2R}{R+Z} = 0 \text{ olur. Buradan da } u_R, i_R \text{ ve } u_y, \text{ ve } i_y \text{ için,}$$

$$u_R = \beta_u \cdot u_i = 0$$

$$i_R = \frac{2u_i}{Z+R} = 2i_i$$

$$u_y = -u_i$$

$$i_y = i_i$$

olur.

c) $R = z$ olması durumu:

Bu durumda hat sonu karakteristik empedansa bağlı olduğundan,

$$\beta_u = \frac{2R}{R+Z} = 1 \text{ olur. Buradan da } u_R, i_R \text{ ve } u_y, \text{ ve } i_y \text{ için,}$$

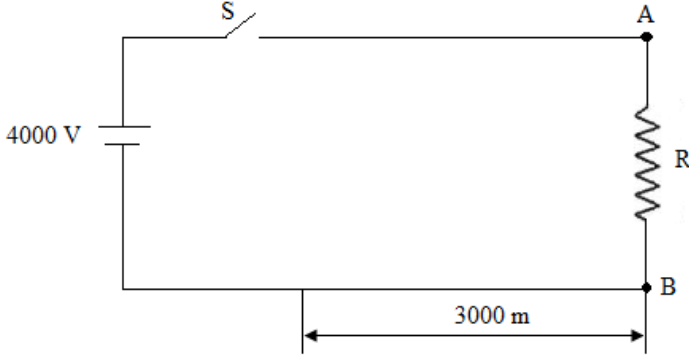
$$u_R = \frac{2R}{Z+R} u_i = u_i$$

$$i_R = \frac{2U_i}{Z+R} = i_i$$

$$u_y = 0 ; i_y = 0 \text{ olur.}$$

Örnek 1.2: 3000 m boyunda omik direnci ve kaçak iletkenliği ihmal edilmiş bir hattın metre başına endüktansı ve kapasitesi, uygun olarak

$L_0 = 1,333\mu\text{H/m}$ ve $C_0 = 8,333 \text{ PF/m}$ 'dir. Hat sonuna değeri 600Ω olan bir direnç bağlıdır.



Şekildeki S anahtarı kapatılıp kaynak gerilimi bu hatta uygulandığında;

- Karakteristik empedansı, dalganın yayılma hızını (ilerleme hızını), yansıma katsayısını hesaplayınız.
- Gerilim dalgası kaç saniye sonra hat sonuna ulaşır?
- Hat sonunda ilk yansıyan gerilim ve hat sonu gerilimini (Dirence uygulanan gerilimi) hesaplayınız.
- Hat sonunda ilk yansıyan akımı ve dirençten geçen akımı hesaplayınız.
- Hattın eşdeğer devresini çiziniz.

Çözüm 1.2:

$$a) Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \sqrt{\frac{1,333 \cdot 10^{-6}}{8,333 \cdot 10^{-12}}} = \sqrt{160000} = 400 \Omega$$

$$V = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{\sqrt{1,333 \cdot 10^{-6} \cdot 8,333 \cdot 10^{-12}}} = 300000 \text{ km/s}$$

$$\alpha_u = \frac{R-Z_0}{R+Z_0} = \frac{600-400}{600+400} = \frac{200}{1000} = 0,2$$

$$b) \quad t = \frac{l}{v} = \frac{30 \cdot 10^2}{3 \cdot 10^8} = 10 \cdot 10^{-6} = 10 \mu s$$

$$c) \quad u_i = 4000 \text{ V}$$

$$u_y = \alpha_u \cdot u_i = 0,2 \cdot 4000 = 800 \text{ V}$$

$$u_A = u_i + u_y = 4000 + 800 = 4800 \text{ V}$$

$$u_A = u_R = 4800 \text{ V (Dirence uygulanan gerilim)}$$

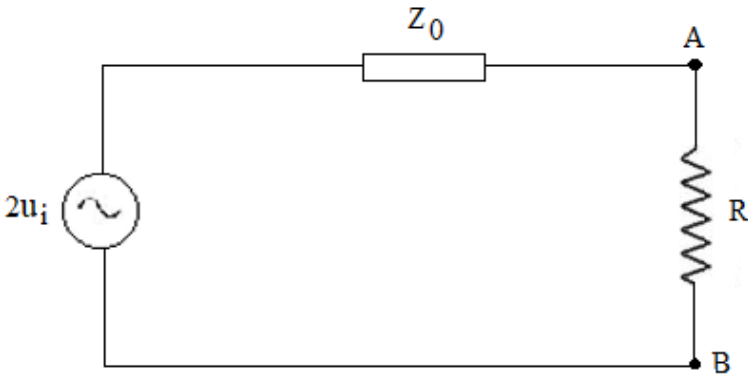
$$d) \quad i_i = \frac{u_i}{Z_0} = \frac{4000}{400} = 10 \text{ A}$$

$$i_y = - \frac{u_y}{Z_0} = - \frac{800}{400} = -2 \text{ A}$$

Dirençten geçen akım ise,

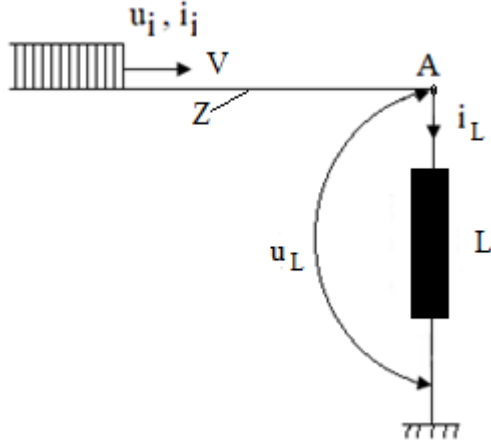
$$i_R = \frac{u_R}{R} = \frac{4800}{600} = 8 \text{ A olur.}$$

e) $i_R = \frac{2u_i}{R+Z_0}$ bağıntısına göre hattın eşdeğer devresi aşağıdaki şekilde verilmiştir.



1.4.2. Sonu L endüktansı ile bağlı olan bir hat durumu

Sonu L endüktansı ile bağlı olan Z karakteristik empedansına sahip bir hat ile u_i ilerleyen gerilim dalgasının V hızı ile A sınır noktasına gelmesi durumu Şekil 1.12'de gösterilmiştir.



Şekil 1.12. Sonu L endüktansı ile bağlı olan bir hat (Özkaya.1988)

İlerleyen gerilim dalgası (u_i) A sınır noktasına geldiğinde, L endüktansı nedeniyle yansır ve hat üzerinde bir u_y yansıyan gerilim oluşur. L endüktansından geçen i_L akımının değeri A sınır noktasındaki toplam gerilime bağlıdır. A sınır noktası için,

$$u_A = u_i + u_y = u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (1.58)$$

$$i_A = i_i + i_y = \frac{u_i}{Z} - \frac{u_y}{Z} = i_L \quad (1.59)$$

yazılabilir. Denklem (1.59) ifadesinin her iki tarafını Z ile çarparsak,

$$u_i - u_y = Z \cdot i_L \quad (1.60)$$

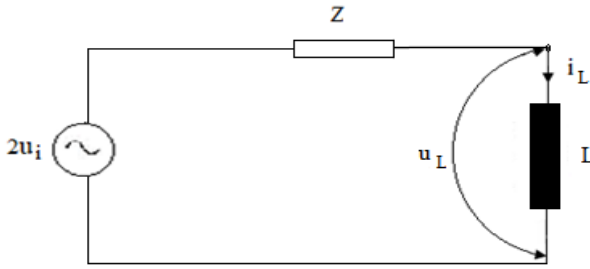
elde edilir.

Denklem (1.60) ifadesi ile Denklem (1.58) ifadesini taraf tarafa toplanırsa,

$$2u_i = Z \cdot i_L + L \frac{di_L}{dt} \quad (1.61)$$

elde edilir.

Denklem (1.61) ifadesi emk'i $2u_i$ ve iç direnci Z olan bir eşdeğer üreteç yardımı ile de bulunabilir. Eşdeğer üreteç şeması, Şekil 1.13'te gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Eşdeğer üreteç şeması (Özkaya.1988)

Şekil 1.13'ten,

$$2u_i = Z \cdot i_L + L \frac{di_L}{dt} \quad (1.62)$$

yazılabilir.

Denklem (1.62)'nin çözümü u_i geriliminin şekline bağlıdır. Eğer $u_i = u_0 = \text{sabit}$ ise bu durumda $i_L(t)$ akımı,

$$i_L(t) = \frac{2u_0}{Z} (1 - e^{-t/T}) = 2I_0(1 - e^{-t/T}) \quad (1.64)$$

şeklinde bulunur.

Burada:

$T = \frac{L}{Z}$; $I_0 = \frac{u_0}{Z}$ kabul edilmiştir.

u_L gerilimi için,

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = 2u_0 e^{-t/T} \quad (1.65)$$

elde edilir. Denklem (1.58) ifadesinden u_y yansıyan gerilimi için,

$$u_y = u_L - u_i = 2u_0 e^{-t/T} - u_0 = u_0(2e^{-t/T} - 1) \quad (1.66)$$

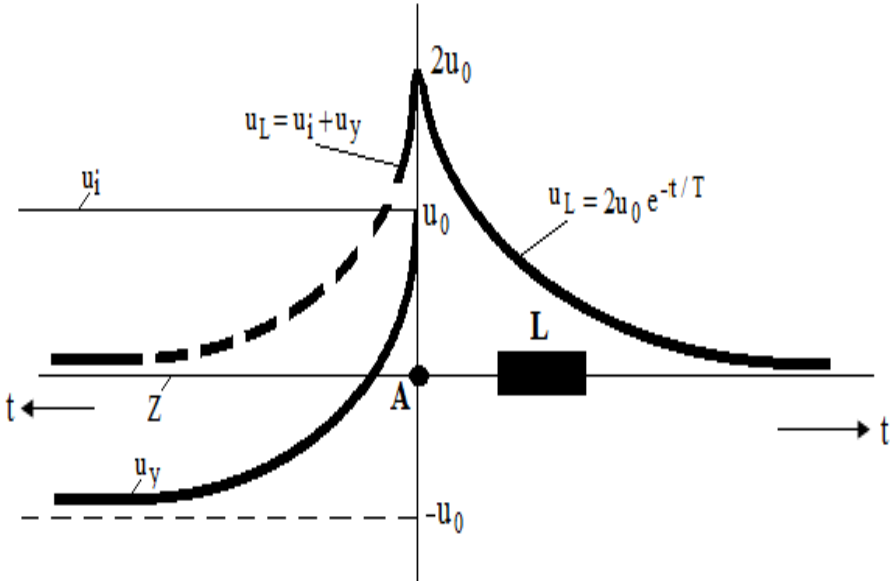
yazılabilir.

Yansıyan akım (i_y) için,

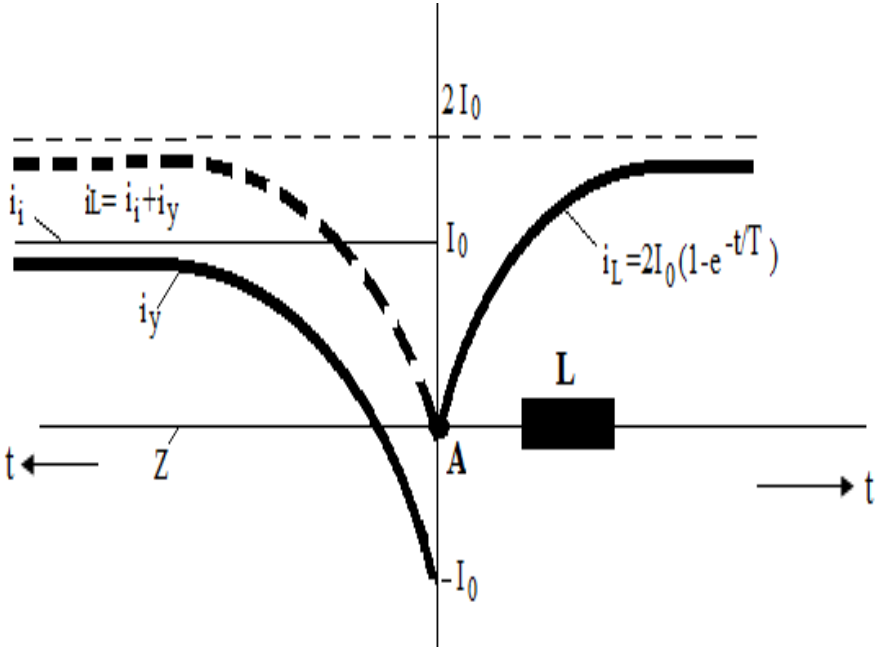
$$i_y = -\frac{u_y}{Z} = -\frac{u_0}{Z}(2e^{-t/T} - 1) = -I_0(2e^{-t/T} - 1) \quad (1.67)$$

yazılabilir.

Gerilim ve akım diyagramları Şekil 1.14'te gösterilmiştir.

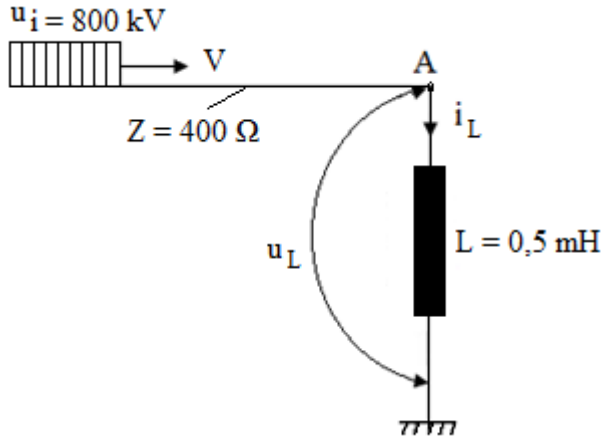


Şekil 1.14a. Gerilim diyagramı (Özkaya.1988)



Şekil 1.14 b. Akım diyagramı (Özkaya.1988)

Örnek 1.3: Aşağıdaki şekilden görüldüğü gibi $u_i = 800$ kV'luk bir yürüyen gerilim dalgası A sınır noktasına doğru ilerlemektedir.



- a) Birinci yansıma ve kırılmadan $t = 1\mu\text{s}$ sonra Z ve L üzerindeki akım ve gerilim değerlerini hesaplayınız.

b) Gerilim ve akım diyagramlarını çiziniz.

Çözüm 1.3:

$$a) T = \frac{L}{Z} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3} H}{400 \Omega} = 1,25 \mu s$$

$t = 1 \mu s$ için,

$$t/T = \frac{1}{1,25} = 0,8$$

$$i_i = \frac{u_i}{Z} = \frac{800 kV}{400 \Omega} = 2 kA$$

$$i_L(t) = 2I_0(1 - e^{-t/T}) = 2 \cdot 2 (1 - e^{-0,8}) = 2,2 kA$$

$$u_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = 2u_i e^{-t/T} = 2 \cdot 800 \cdot e^{-0,8} = 1600 \cdot e^{-0,8} \cong 719 kV$$

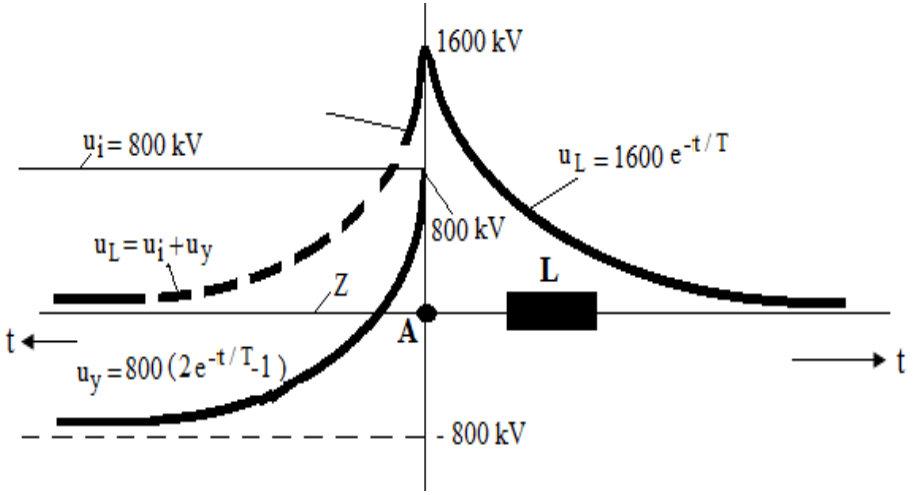
$$u_y = u_i (2 e^{-t/T} - 1) = 800 (2e^{-0,8} - 1) = -81,07 kV$$

$$i_y = -I_0 (2 e^{-t/T} - 1) = -2(2e^{-0,8} - 1) = 0,2 kA$$

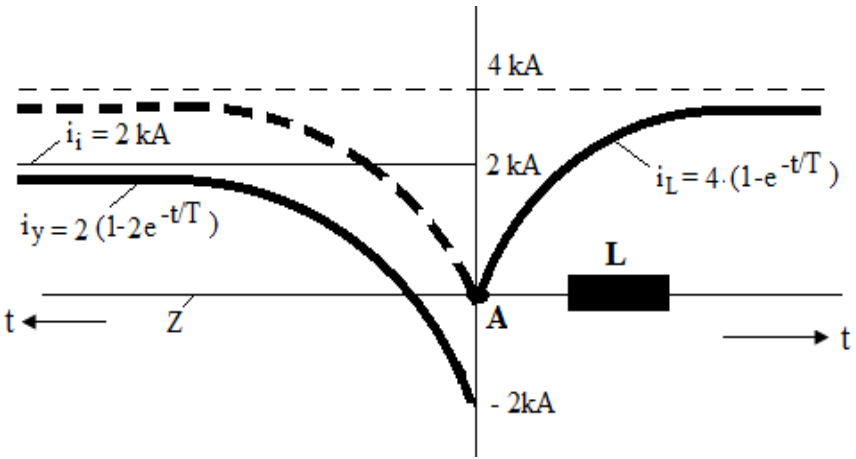
$$u_i + u_y = 800 + (-81,07) \cong 719 kV = u_L$$

$$i_i + i_y = 2 + 0,2 = 2,2 kA = i_L$$

b) Gerilim ve akım diyagramları aşağıdaki şekilde verilmiştir.



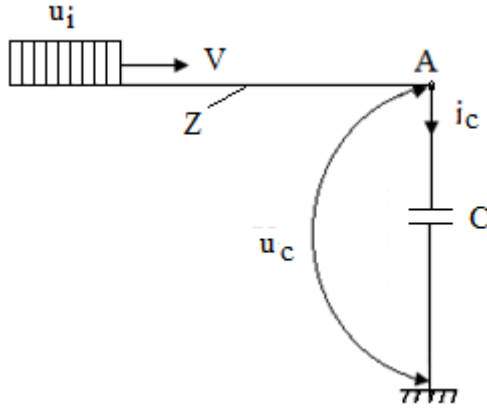
a) Gerilim diyagramı



b) Akım diyagramı

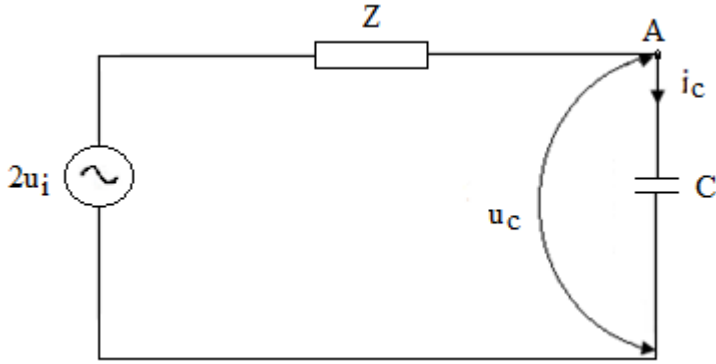
1.4.3. Sonu C kapasite ile bağlı olan bir hat durumu

Sonu C kapasite ile bağlı olan Z karakteristik empedansına sahip bir hat ile u_i ilerleyen gerilim dalgasının V hızı ile A sınır noktasına gelmesi durumu Şekil 1.15'te verilmiştir.



Şekil 1.15. Sonu C kapasite ile bağlı olan bir hat (Özkaya.1988)

İlerleyen gerilim dalgası (u_i) A sınır noktasına geldiğinde, C kapasitesi nedeniyle yansır ve hat üzerinde bir u_y yansıyan gerilimi oluşur. Şekil 1.15'e uygun eşdeğer üreteç şeması, Şekil 1.16'da gösterilmiştir.



Şekil 1.16. Eşdeğer üreteç şeması (Özkaya.1988)

Şekil 10'daki eşdeğer üreteç şemasından,

$$2u_i = Zi_c + u_c = Zi_c + \frac{1}{C} \int i_c dt \quad (1.68)$$

yazılabilir.

Denklem (1.68)'in çözümü u_i geriliminin şekline bağlıdır. Eğer $u_i = u_0 = \text{sabit}$ ise bu durumda $i_c(t)$ akımı,

$$i_c(t) = \frac{2u_0}{Z} e^{at} = \frac{2u_0}{Z} e^{-t/T} \quad (1.69)$$

şeklinde bulunur.

Burada:

$$A = \frac{1}{ZC} = \frac{1}{T} \text{ kabul edilmiştir.}$$

u_c gerilimi için,

$$u_c = \frac{1}{C} \int i_c dt = 2 \frac{u_0}{ZC} [-Te^{-t/T}] \Big|_0^t = 2u_0(1 - e^{-t/T}) \quad (1.70)$$

elde edilir.

$u_i + u_y = u_c$ olduğundan u_y yansıyan gerilimi için,

$$u_y = u_c - u_i = u_0(1 - 2e^{-t/T}) \quad (1.71)$$

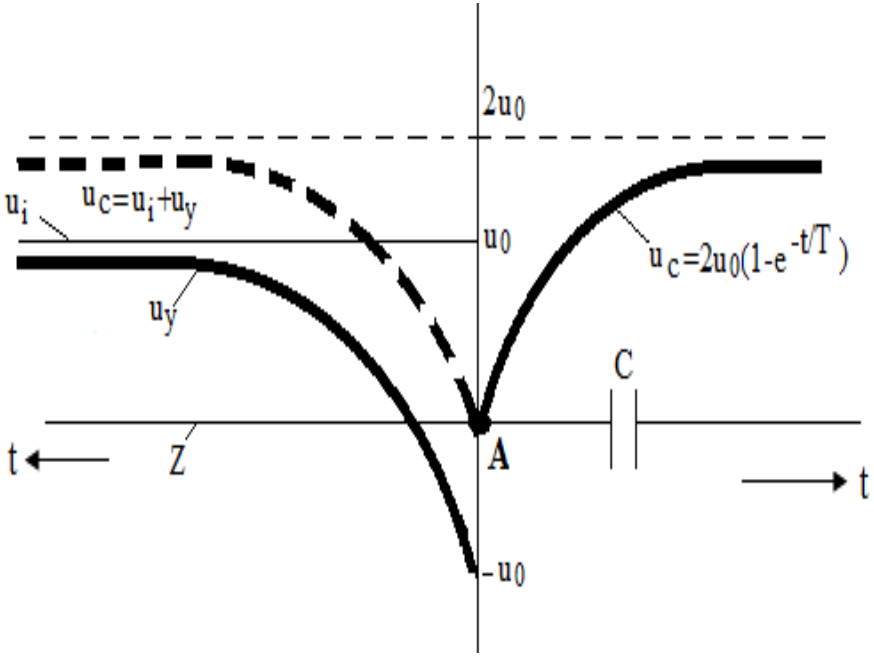
yazılabilir.

i_y yansıyan akım için,

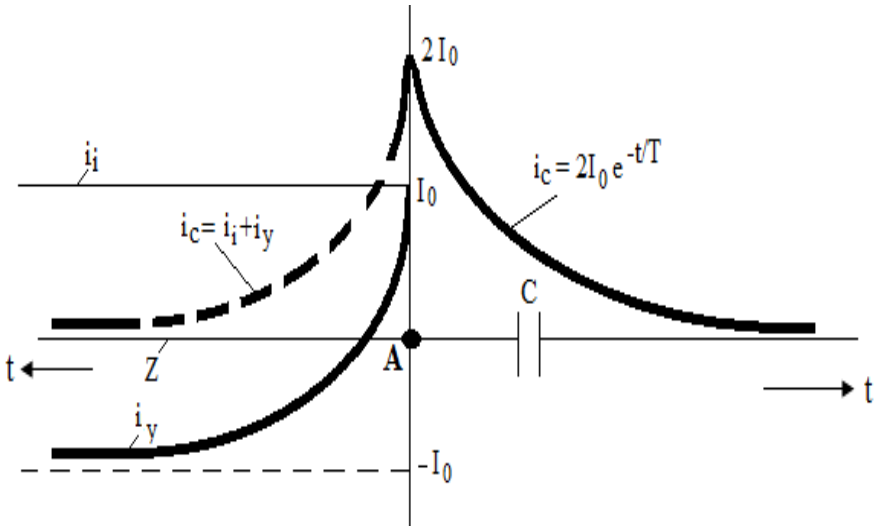
$$i_y = - \frac{u_y}{Z} = - \frac{u_0}{Z} (1 - 2e^{-t/T}) = I_0 (1 - 2e^{-t/T}) \quad (1.72)$$

yazılabilir.

Sonu C kapasitesi ile bağlı olan bir hatta gerilim ve akım diyagramları Şekil 1.17'de gösterilmiştir.

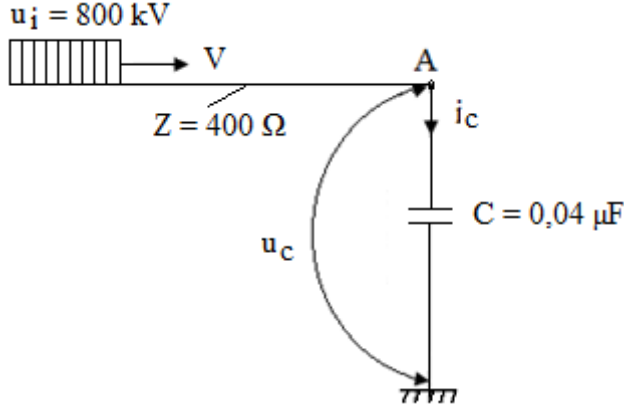


Şekil 1.17 a. Gerilim diyagramı (Özkaya.1988)



Şekil 1.17b. Akım diyagramı (Özkaya.1988)

Örnek 1.4: Aşağıdaki şekilden görüldüğü gibi 800 kV'lık bir yürüyen gerilim dalgası A sınır noktasına doğru ilerlemektedir.



- Birinci yansıma ve kırılmadan $t = 1 \mu\text{s}$ sonra Z ve C üzerindeki akım ve gerilim değerlerini hesaplayınız.
- Gerilim ve akım diyagramlarını çiziniz.

Çözüm 1.4:

$$\text{a) } i_i = \frac{u_i}{Z} = \frac{800 \text{ kV}}{400 \Omega} = 2 \text{ kA}$$

$$T = ZC = 400 \cdot 0,04 \cdot 10^{-6} = 16 \mu\text{s}$$

$$t/T = 1 \cdot 10^{-6} / 16 \cdot 10^{-6} = 0,0625$$

$$e^{0,0625} \cong 1,0645$$

$$\frac{1}{1,0645} = 0,93941$$

$$i_c(t) = \frac{2u_i}{Z} e^{-t/T} = 2 \frac{800}{400} e^{-0,0625} = 3,75764 \text{ kA}$$

$$u_c(t) = 2u_i(1 - e^{-t/T}) = 2 \cdot 800 (1 - e^{-0,0625})$$

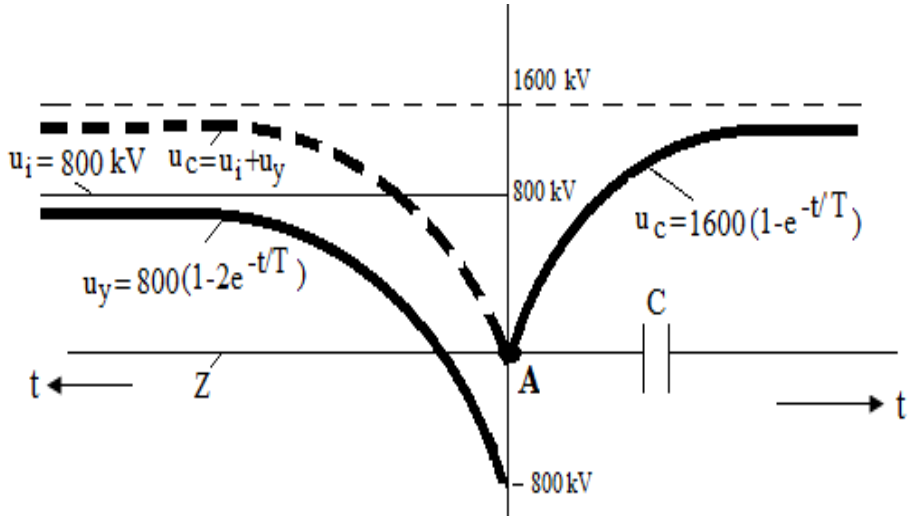
$$u_c(t) = 1600 - 1503,056 = 94,944 \text{ kV}$$

$$u_y = u_0(1-2e^{-t/T}) = 800 (1-2e^{-0,0625})$$

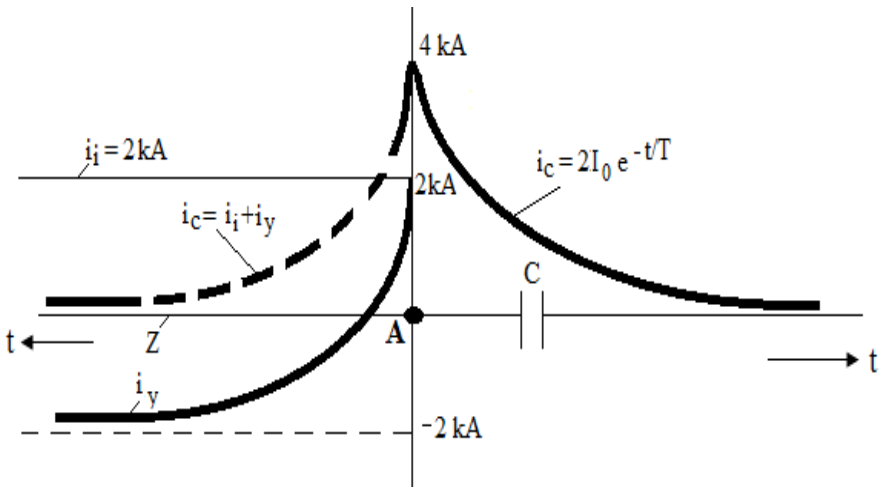
$$u_y = 800-1600 \cdot 0,93941 = 800-1503,056 = -703,056 \text{ kV}$$

$$i_y = -\frac{u_y}{Z} = -\frac{703,056}{400} = 1,75764 \text{ kA}$$

b) Gerilim ve akım diyagramları



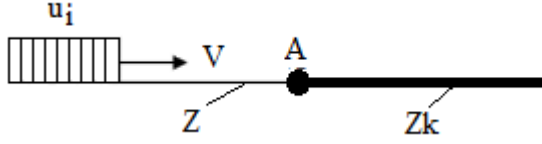
a. Gerilim diyagramı



b. Akım diyagramı

1.4.4. Bir Hattan Bir Kabloya Geçiş Durumu

Bir hattan bir kabloya geçiş durumu, Şekil 1.18’de gösterilmiştir.



Şekil 1.18. Bir hattan bir kabloya geçiş durumu (Özkaya.1988)

Şekil 1.18’den A sınır noktası için,

$$u_A = u_i + u_y = u_k = Z_k \cdot i_k \quad (1.73)$$

$$i_A = i_i + i_y = \frac{u_i}{Z} - \frac{u_y}{Z} = \frac{u_k}{Z_k} = i_k \quad (1.74)$$

yazılabilir. Denklem (1.74) ifadesinden,

$$u_i - u_y = Z_k \cdot i_k \quad (1.75)$$

yazılabilir.

Denklem (1.73) ve Denklem (1.75) ifadelerini taraf tarafa toplanırsa,

$$2u_i = (Z + Z_k) \cdot i_k \quad (1.76)$$

elde edilir.

Denklem (1.76) ifadesinden i_k için,

$$i_k = \frac{2u_i}{Z + Z_k} \quad (1.77)$$

yazılabilir. u_k için,

$$u_k = Z_k \cdot i_k = \frac{2Z_k}{Z + Z_k} u_i \quad (1.78)$$

yazılabilir.

$u_k = u_i + u_y$ olduğundan u_y yansıyan gerilimi için,

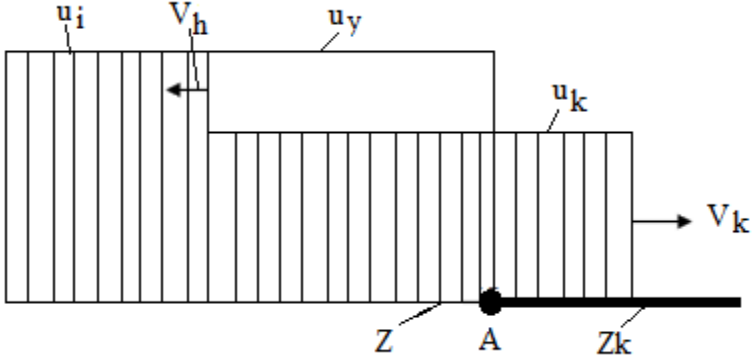
$$u_y = u_k - u_i = \left(\frac{2Z_k}{Z + Z_k} - 1 \right) u_i = \frac{Z_k - Z}{Z + Z_k} u_i \quad (1.79)$$

yazılabilir.

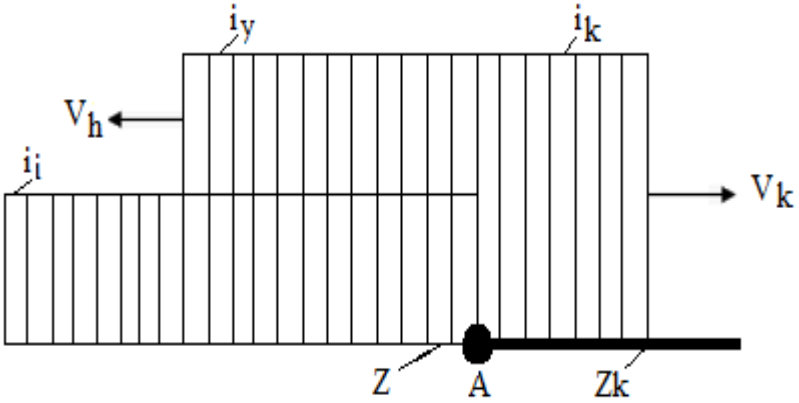
i_y yansıyan akım için,

$$i_y = -\frac{u_y}{Z} = -\frac{Z_k - Z}{Z + Z_k} \frac{u_i}{Z} = -\frac{Z_k - Z}{Z + Z_k} i_i \quad (1.80)$$

Gerilim ve akım diyagramları Şekil 1.19'da verilmiştir.

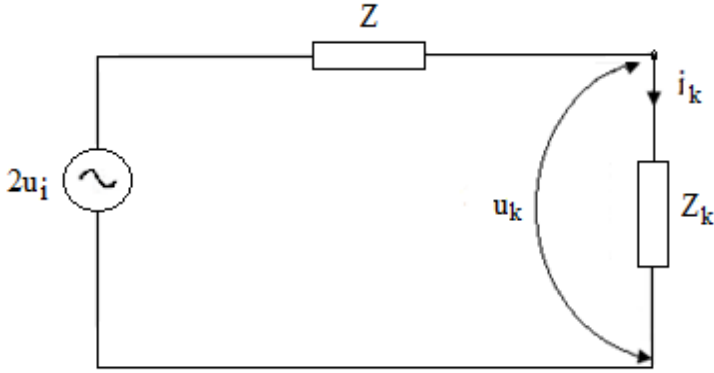


Şekil 1.19a. Gerilim diyagramı (Özkaya.1988)



Şekil 1.19b. Akım diyagramı (Özkaya.1988)

Kablunun i_k ve u_k değerlerini hesaplamak için emk 'i $2u_i$ ve iç direnci z olan bir eşdeğer üreteç kullanılabilir. Eşdeğer üreteç devresi, Şekil 1.20'de gösterilmiştir.



Şekil 1.20. Eşdeğer üreteç devresi (Özkaya.1988)

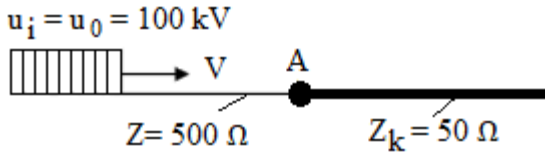
Şekil 1.20'den i_k ve u_k için,

$$i_k = \frac{2u_i}{Z+Z_k} \quad (1.81)$$

$$u_k = Z_k \cdot i_k = \frac{2Z_k}{Z+Z_k} u_i \quad (1.82)$$

yazılabilir.

Örnek 1.5: Aşağıdaki şekilde verilen hat-kablo sisteminde hattın kabloya doğru $u_i = u_0 = 100$ kV'luk bir yürüyen gerilim dalgası ilerlemektedir.



A sınır noktasında birinci yansıma ve kırılmadan sonra,

- Akım ve gerilim değerlerini hesaplayınız.
- Yansımadan $1 \mu s$ sonra hatta ve kabloda dalganın aldığı uzaklığı bulunuz.
- Gerilim ve akım diyagramlarını çiziniz.

Çözüm 1.5:

$$a) \quad i_i = \frac{u_i}{Z} = \frac{100 \text{ kV}}{500 \Omega} = 0,2 \text{ kA} = 200 \text{ A}$$

$$i_k = \frac{2u_i}{Z+Z_k} = \frac{2 \cdot 100 \text{ kV}}{500 \Omega + 50 \Omega} \cong 0,364 \text{ kA} \cong 364 \text{ A}$$

$$i_k = i_i + i_y$$

$$i_y = i_k - i_i = 364 - 200 = 164 \text{ A}$$

$$u_y = -z \cdot i_y = -500 \cdot 164 = -82000 \text{ V} = -82 \text{ kV}$$

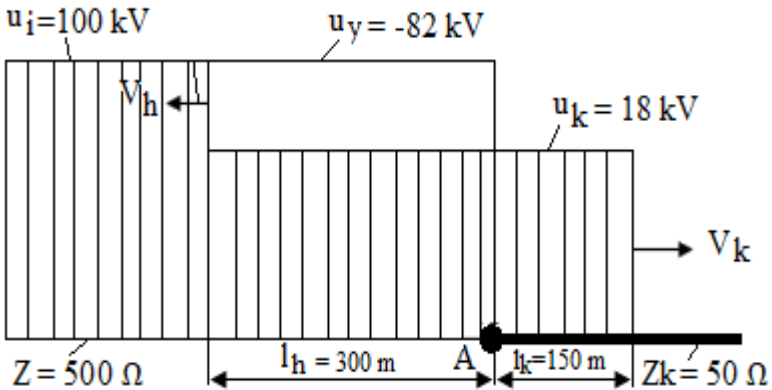
b) Yürüyen dalganın ilerleme hızı $V_h = 300\,000 \text{ km/s}$; $V_k = 150\,000 \text{ km/s}$ olduğuna göre $t = 1 \mu\text{s}$ sonra yürüyen dalga hatta,

$$l_h = V_h \cdot t = 300\,000 \cdot 10^{-6} = 0,3 \text{ km} = 300 \text{ m}$$

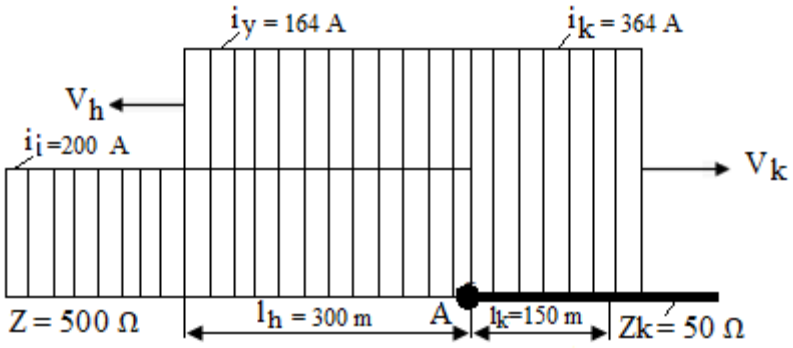
kabloda,

$$l_k = V_k \cdot t = 150\,000 \cdot 10^{-6} = 0,15 \text{ km} = 150 \text{ m} \text{ yol alır.}$$

c) Gerilim ve akım diyagramları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



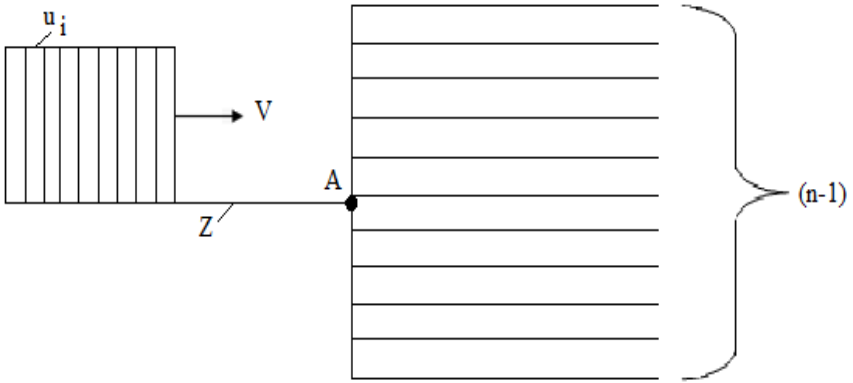
a. Gerilim diyagramı



b. Akım diyagramı

1.5. Yürüyen Dalgaların Şalt Sahasına Gelmesi Durumu

Yürüyen dalgaların şalt sahasına gelmesi durumu, Şekil 1.21’de verilmiştir.



Şekil 1.21. Yürüyen dalgaların şalt sahasına gelmesi durumu (Тиняков.1982)

Şekil 1.21’den A sınır noktasındaki kırılan gerilim dalgası için,

$$u_A = \beta_u u_i = \frac{2Z(n-1)}{Z+Z/(n-1)} u_i = \frac{2u_i}{n} \quad (1.83)$$

yazılabilir.

Burada:

n- şalt sahasına bağlı gelen ve giden hatların toplam sayısıdır.

$Z_2 = \frac{Z}{n-1}$ olup şalt sahasından çıkan hatların eşdeğer karakteristik

empedansıdır. Eğer $n = 1$ ise bu durumda şalt sahasında gelen hat var, giden hat ise olmadığından u_A için,

$$u_A = 2u_i \quad (1.84)$$

yazılabilir.

$n = 2$ olduğunda şalt sahasında bir adet gelen hat ve bir adet de giden hat vardır. Bu durumda;

$$u_A = u_i \quad (1.85)$$

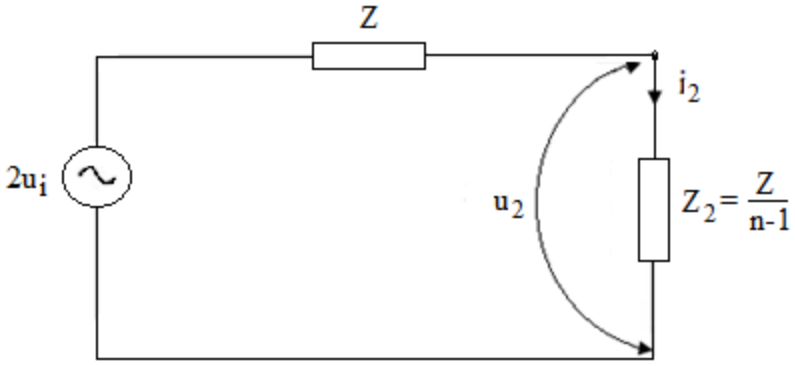
yazılabilir.

$n = 6$ olduğunda ise,

$$u_A = \frac{u_i}{3} \quad (1.86)$$

yazılabilir.

Bu durumda, şalt sahasına gelen yürüyen gerilim dalgası şalt sahasının izolasyonu için tehlikeli olmayan boyuta otomatik olarak indirilmiş olur. Şalt sahasının korunması için ilave koruma gerekmez. Şekil 1.21'e uygun eşdeğer üreteç şeması Şekil 1.22'de verilmiştir.



Şekil 1.22. Eşdeğer üreteç şeması (Тиняков.1982)

Şekil 1.22'den i_2 için,

$$i_2 = \frac{2u_i}{Z + \frac{Z}{n-1}} \quad (1.87)$$

yazılabilir.

u_2 için,

$$u_2 = u_A = Z_2 \cdot i_2 = \frac{Z}{(n-1)} \cdot \frac{2u_i}{Z + \frac{Z}{n-1}} = \frac{2u_i}{n} \quad (1.88)$$

yazılabilir.

$u_2 = u_A = u_i + u_y$ olduğundan u_y yansıyan gerilimi için,

$$u_y = u_2 - u_i = \frac{2u_i}{n} - u_i = \left(\frac{2}{n} - 1 \right) u_i \quad (1.89)$$

yazılabilir. i_i ilerleyen akımı için,

$$i_i = \frac{u_i}{Z} \quad (1.90)$$

yazılabilir.

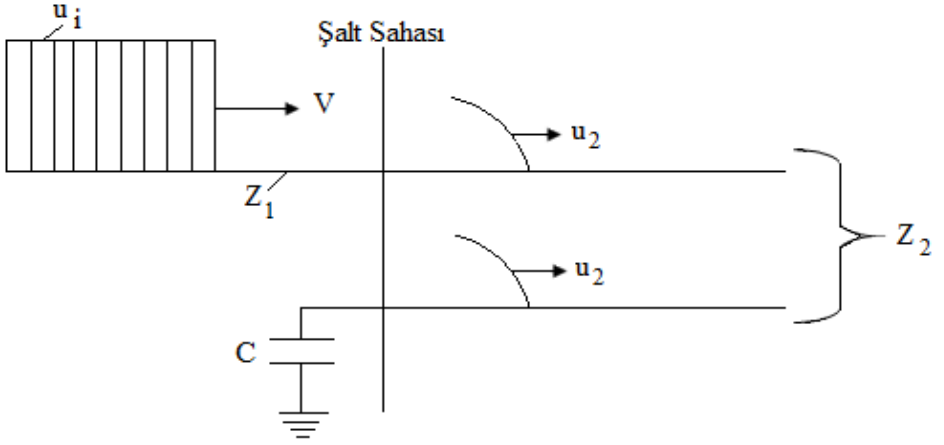
i_y yansıyan akımı için,

$$i_y = -\frac{u_y}{Z} = -\frac{\left(\frac{2}{n}-1\right)}{Z} u_i = \left(1 - \frac{2}{n}\right) i_i \quad (1.91)$$

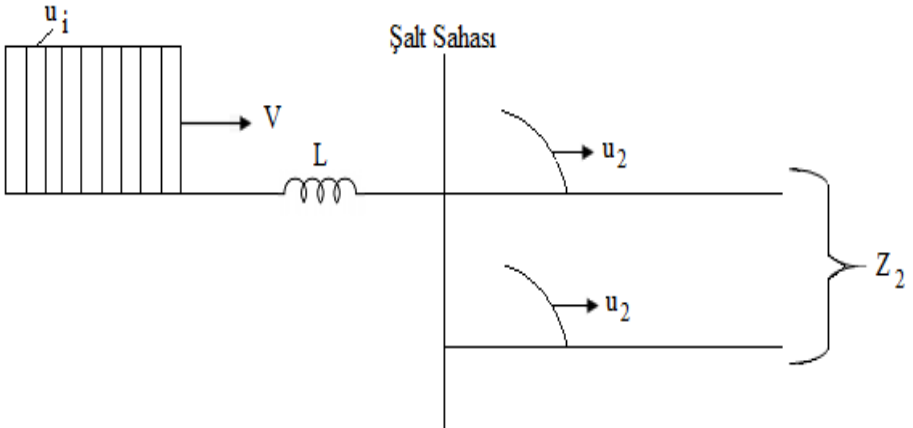
yazılabilir.

1.6. Elektromanyetik Dalgasının Kapasiteden Yan, Endüktanstan İse Doğrudan Geçmesi

Şalt sahasının barasına gelen gerilim dalgası şalt sahasının kapasitesinden yan, endüktansından ise doğrudan geçmektedir. Bu durumda gerilim dalgasının genliği değişmez. Fakat gerilim dalgasının şekli değişmektedir. Her iki durum Şekil 1.23'te verilmiştir.

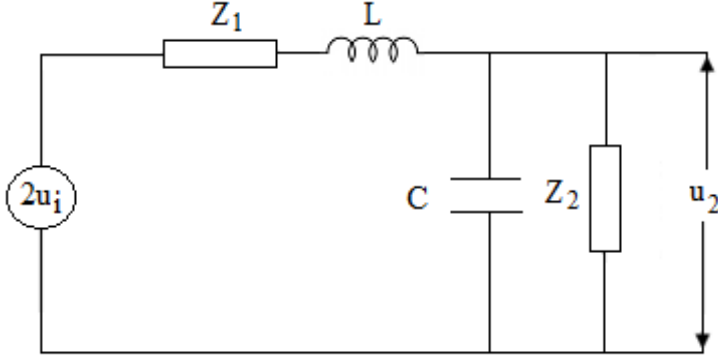


Şekil 1.23a. Gerilim dalgasının kapasiteden yan geçmesi (Тиняков.1982)

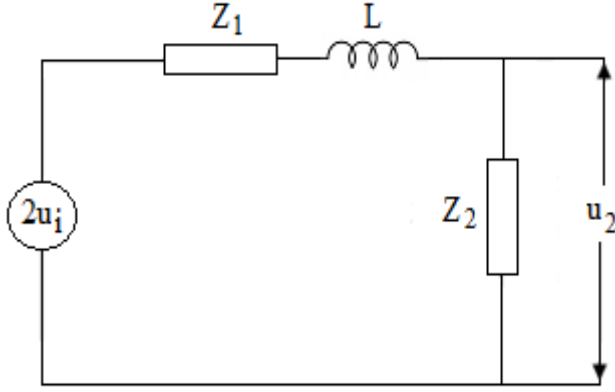


Şekil 1.23b. Gerilim dalgasının edüktanstan doğrudan geçmesi (Тиняков.1982)

Şekil 1.23'e uygun eşdeğer devreler Şekil 1.24'de verilmiştir.



Şekil 1.24 a. Şekil 1.23 a'ya uygun eşdeğer devre (Тиняков.1982)



Şekil 1.24 b. Şekil 1.23 b'ye uygun eşdeğer devre (Тиняков.1982)

Burada;

Z_2 – şalt sahasından giden enerji iletim hatlarının eşdeğer empedansıdır.

Hesap işlemleri, operatör yöntemine göre yapılabilir. Bunun için $2u_i$ ilerleyen sabit gerilimi, $2u_i \frac{1}{p}$ şeklinde ifade edilir. Şekil 1.24'deki eşdeğer devreden Z_2 empedansındaki gerilim için aşağıdaki ifadeler yazılabilir. C kapasiteli eşdeğer devre için,

$$U(P) = 2u_i \frac{1}{P} \cdot \frac{\frac{Z_2 \cdot 1/PC}{Z_2+1/PC}}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot 1/PC}{Z_2+1/PC}} = 2u_i \frac{1}{Z_1 C} \cdot \frac{1}{P (P + \frac{Z_1+Z_2}{CZ_1 \cdot Z_2})} \quad (1.92)$$

L endüktanslı eşdeğer devre için,

$$U(P) = 2u_i \frac{1}{P} \cdot \frac{Z_2}{Z_1+Z_2+PL} = 2u_i \frac{Z_2}{L} \cdot \frac{1}{P (P + \frac{Z_1+Z_2}{L})} \quad (1.93)$$

Eğer $\frac{\alpha}{P (P+\alpha)} \leftrightarrow 1-e^{-\alpha t}$ olduğu kabul edilirse, bu durumda kırılan gerilim dalgası için,

$$u_2(t) = u_i \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2} (1 - e^{-t/T}) = u_i \beta_u (1 - e^{-t/T}) \quad (1.94)$$

yazılabilir.

Burada:

T sabiti kapasiteli durum için,

$$T_c = C \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1+Z_2} \quad (1.95)$$

şeklindedir.

T sabiti endüktanslı durum için,

$$T_L = \frac{L}{Z_1+Z_2} \quad (1.96)$$

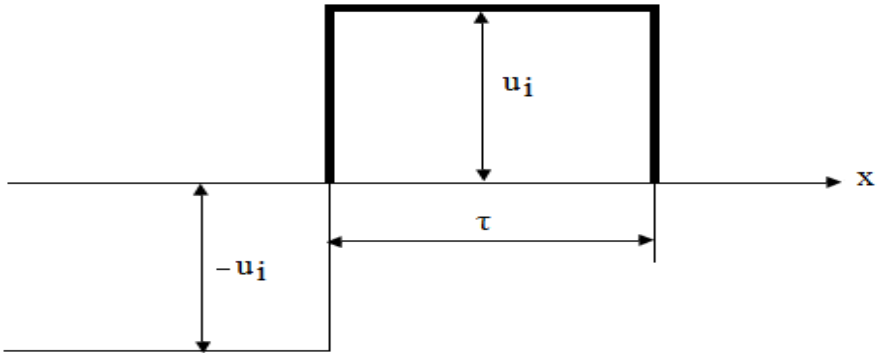
şeklindedir.

Denklem (1.94) ifadesinden görüleceği gibi C kapasitesi veya L endüktansı yürüyen gerilim dalgasının cephesinin dikliğini T zaman sabitine bağlı olarak azaltmaktadır. Denklem (1.94) ifadesinden $t = T$ olduğunda şalt sahasının barasında gerilim $0,63u_i\beta_u$ değerine ulaştığı görülmektedir. Şalt sahasının barasına bağlı özel kondansatör

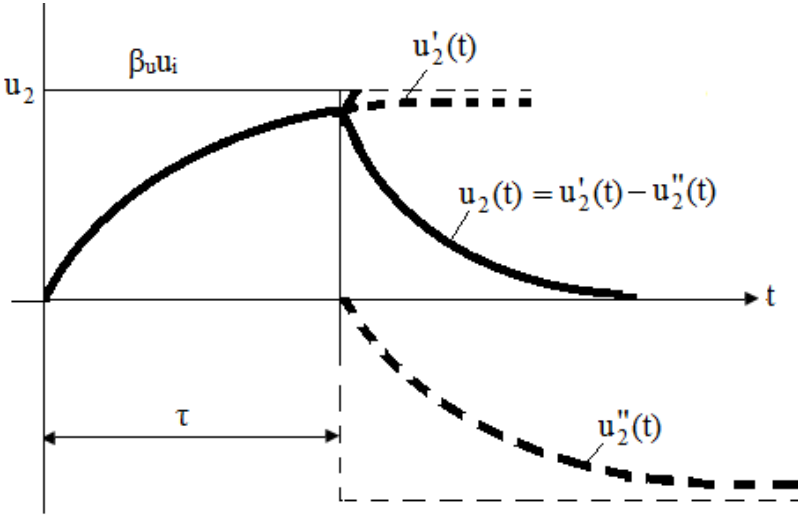
bataryaları olmadığı durumlarda C kapasitesinin değeri genelde $(1-5) \cdot 10^{-3} \mu\text{F}$ aralığında değişmektedir. Gelen hattı olan, giden hattı olmayan şalt sahaları için, $T_C = (1-5) \cdot 10^{-3} \cdot 500 = 0,5-2,5 \mu\text{s}$ aralığında değişmektedir. Gelen hat kablo olduğunda ise T_C 'nin değeri 10 kat daha az olmaktadır. Şalt sahasından çıkan hatların sayısı arttıkça T_C 'nin değeri azalır. Şalt sahasının barası ile gelen hat arasına bağlı reaktörün endüktansının değeri genelde 2-5 mH arasında değişir. Şalt sahasında bir gelen bir de giden hat ($Z_1 = Z_2 = 500 \Omega$) olduğunda T_L 'nin değeri

$$T_L = \frac{(2-5) \cdot 10^{-3}}{1000} = 2-5 \mu\text{s} \text{ olur.}$$

Kablo olduğunda ise T_L 'nin değeri 10 kat artmaktadır. Dolayısıyla kablo olduğunda, $T_L=20-50 \mu\text{s}$ olur. Sonlu uzunluktaki gelen dalganın kapasiteden yan, endüktanstan doğrudan geçmesi durumuna uygun gerilimler Şekil 1.25'te gösterilmiştir.



Şekil 1.25a. Sonlu uzunluktaki dalga (Тиняков.1982)



Şekil 1.25b. Kırılan dalganın değişimi (Тиняков.1982)

Maksimum kırılan dalga, $t=\tau$ olduğunda oluşur. Bu durumda $u_{2\text{maks}}$ için,

$$u_{2\text{maks}} = u_i \beta_u (1 - e^{-\tau/T}) \quad (1.97)$$

yazılabilir.

Denklem (1.97) ifadesinden τ 'nin değeri T 'den küçük olduğunda kapasite veya endüktans kırılan dalganın genliğinin azaltıldığı görülmektedir.

Bu durumda,

$$1 - e^{-\sigma/T} \cong 1 - \frac{\tau}{T} \quad (1.98)$$

olduğundan $u_{2\text{maks}}$ için,

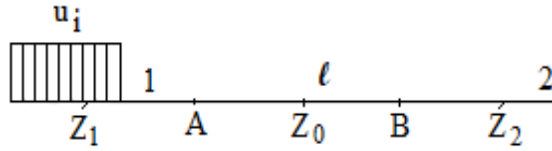
$$u_{2\text{maks}} \cong u_i \beta_u \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \quad (1.99)$$

elde edilir.

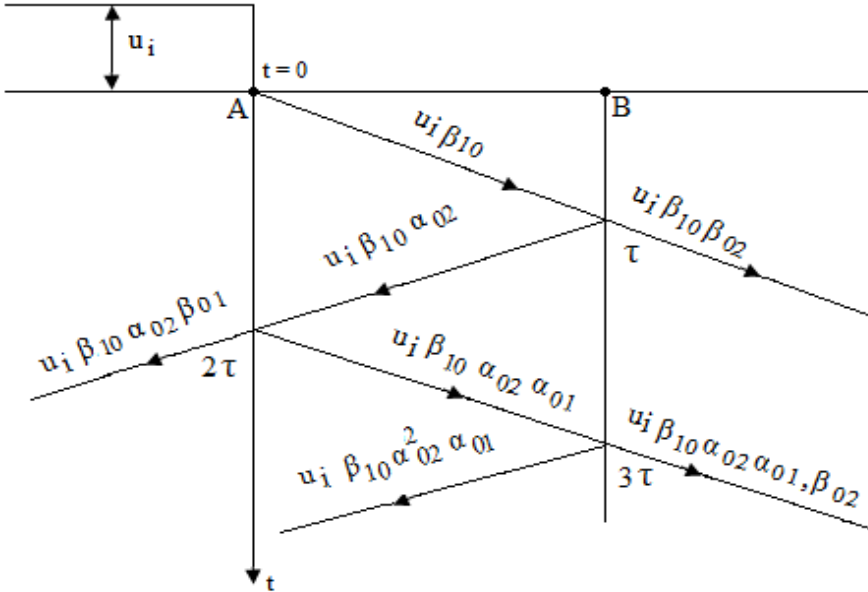
1.7. Yürüyen Dalgaların Çok Katlı Yansıması

Yürüyen bir gerilim dalgası sınır veya yansıma-kırılma noktasında yansıma ve kırılmaya uğramaktadır. Bu durumda hat üzerinde yeni dalgalar oluşmaktadır.

Karakteristik empedansı Z_1 olan sonsuz uzun 1 nolu hat ile dik cepheli yürüyen dalganın A sınır noktasına geldiğini var sayalım. Bu durum Şekil 1.26a'da verilmiştir.



Şekil 1.26a. Yürüyen dalganın A sınır noktasına gelmesi (Тиняков.1982)



Şekil 1.26b. Kırılan dalganın hesaplanması (Тиняков.1982)

AB arasına yan 1 numaralı hat ile 2 numaralı hat arasına karakteristik empedansı Z_0 olan 1 uzunluklu kısa bir hat bağlanmıştır. 2 nolu hattın karakteristik empedansı ise Z_2 'dir. 1 ve 2 nolu hattın uzunluğu, 1 uzunluklu hat ile karşılaştırıldığında çok büyük olduğu için bu hatları sonsuz uzun hat olarak kabul etmek mümkündür.

Burada yansıma katsayısı α ve kırılma katsayısı β iki indisli olarak gösterilmiştir. Birinci indis dalganın hangi hat ile geldiğini gösterir. İkinci indis ise hangisine düştüğünü göstermektedir. 2 nolu hatta kırılan dalgayı bulalım. Kırılan dalganın bulunması Şekil 1.26b'de gösterilmiştir.

Yürüyen gerilim dalgası (u_i), $t=0$ anında A sınır noktasına geldiğinde Z_0 karakteristik empedansına sahip 1 hattından dolayı kırılır. Kırılan dalganın genliği $u_i\beta_{10}$ şeklindedir. $U_i\alpha_{01}$ dalgası 1 hattından dolayı yansır ve bundan sonrası hesaba katılmamaktadır. $\tau = l/V$ anında $u_i\beta_{10}$ dalgası B sınır noktasına ulaşır. Z_2 karakteristik empedansına sahip 2 hattından dolayı bir kırılma olur. Kırılan dalganın genliği $u_i\beta_{10}\beta_{02}$ şeklinde olur. Bundan sonrası hesaba katılmamaktadır. B sınır noktasından yansıyan dalganın genliği, $u_i\beta_{10}\alpha_{02}$ şeklinde olur ve $2\tau = 2l/V$ anında 1 düğüm noktasına varır. Olay bu şekilde devam ederek Şekil 1.26b'deki durum elde edilir.

B noktasındaki n defa yansıma sonrasındaki gerilim n kırılan dalganın toplamı şeklinde,

$$u_{Bn} = u_i\beta_{10}\beta_{02} [1 + \alpha_{01}\alpha_{02} + (\alpha_{01}\alpha_{02})^2 + \dots + (\alpha_{01}\alpha_{02})^{(n-1)}] \quad (1.100)$$

olarak ifade edilir.

Denklem (1.100) ifadesindeki her bir bileşenin toplamı kendi aralarında geometrik ilerlemeyi $\alpha_{01}\alpha_{02}<1$ paydası şeklinde ortaya koymaktadır. Sonsuz büyük sayıda $u_{B\infty}$ için,

$$u_{B\infty} = u_i \beta_{10} \beta_{02} \frac{1}{1 - \alpha_{01} \alpha_{02}} \quad (1.101)$$

yazılabilir.

$\frac{\beta_{10} \beta_{02}}{1 - \alpha_{01} \alpha_{02}}$ yerine

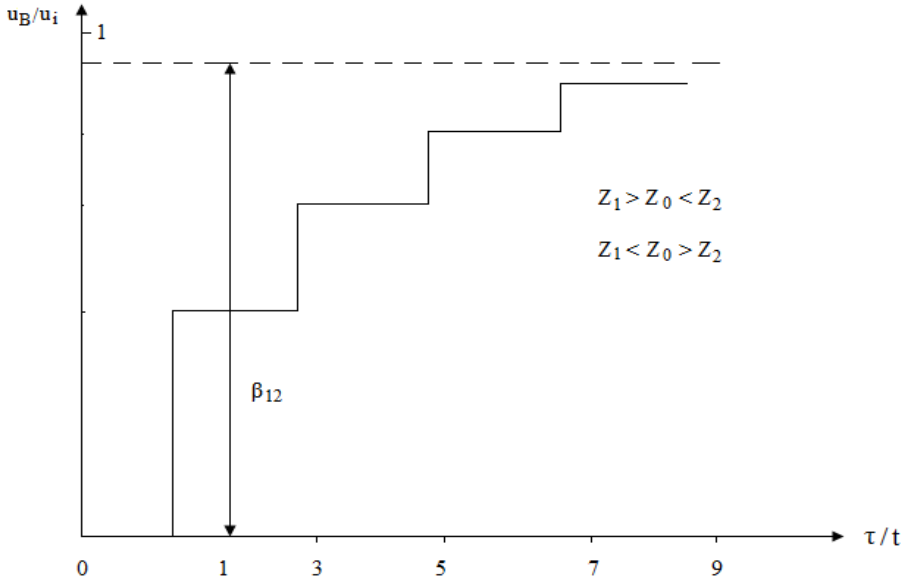
$$\frac{\beta_{10} \beta_{02}}{1 - \alpha_{01} \alpha_{02}} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1.102)$$

olduğunu düşünürsek, bu durumda $u_{B\infty}$ için,

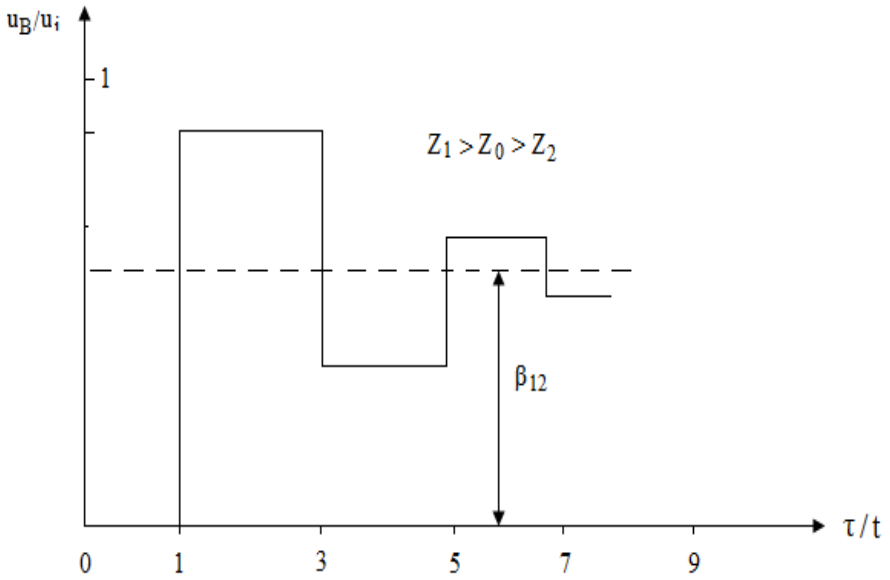
$$u_{B\infty} = u_i \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = u_i \beta_u \quad (1.103)$$

elde edilir.

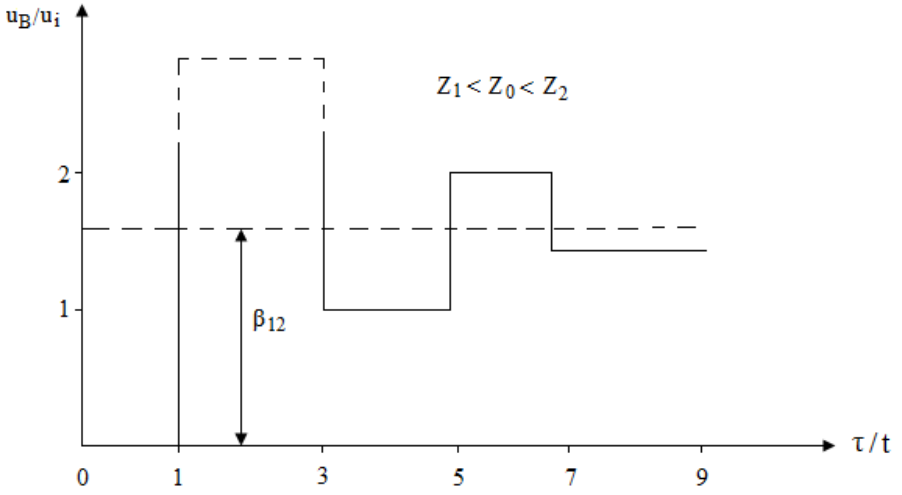
A ve B noktaları arasına bağlanmış olan Z_0 karakteristik empedansına sahip l uzunluklu kablo olduğu zaman B sınır noktasında çok katlı yansıma zamanı gerilimin değişimi Şekil 1.27, Şekil 1.28 ve Şekil 1.29'da gösterilmiştir.



Şekil 1.27. B sınır noktasında çok katlı yansıma zamanı gerilimin değişimi (Тиняков.1982)



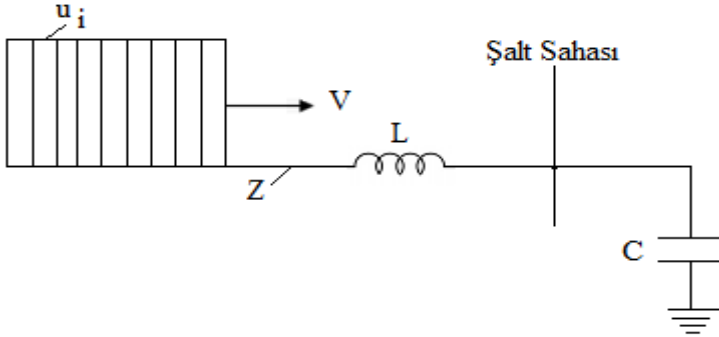
Şekil 1.28. B sınır noktasında çok katlı yansıma zamanı gerilimin değişimi (Тиняков.1982)



Şekil 1.29. B sınır noktasında çok katlı yansımaya zamanı gerilimin değişimi (Тиняков.1982)

1.8. Yürüyen Gerilim Dalgasının Salınım Devresine Gelmesi

Karakteristik empedansı Z olan bir hat ile u_i yürüyen gerilim dalgasının salınım devresine gelmesi durumu Şekil 1.30'da gösterilmiştir.



Şekil 1.30. Yürüyen gerilim dalgasının salınım devresine gelmesi durumu (Тиняков.1982)

Burada:

L- Reaktörün endüktansıdır.

C- Şalt sahasının barasının kapasitesidir.

u_i - Yürüyen gerilim dalgasının sonsuz uzun hat ile C kapasitesine gelmesi durumunda,

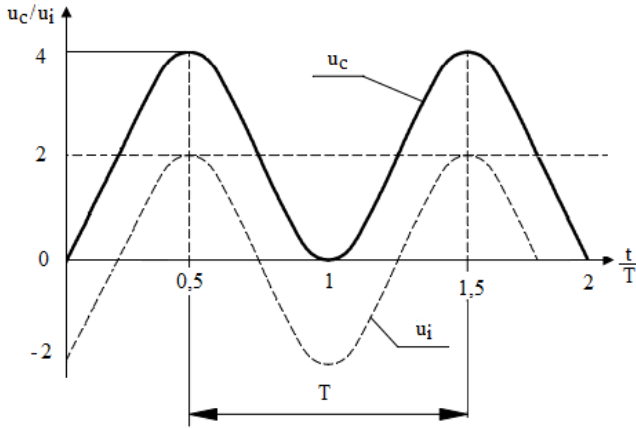
$$u_c(P) = \frac{2u_i}{P} \cdot \frac{1}{PL + \frac{1}{PC}} \cdot \frac{1}{PC} = \frac{2u_i}{LC} \cdot \frac{1}{P(P^2 + \frac{1}{LC})} \quad (1.104)$$

veya

$$u_c(t) = 2u_i (1 - \cos 2\pi \frac{t}{T}) \quad (1.105)$$

yazılabilir.

Denklem (1.105) ifadesinden görüleceği üzere C kapasitesindeki gerilim $2u_i$ sabit geriliminden oluşur ve gerilim $T = 2\pi \sqrt{LC}$ periyotlu olarak değişir. Bu durum Şekil 1.31’de verilmiştir.

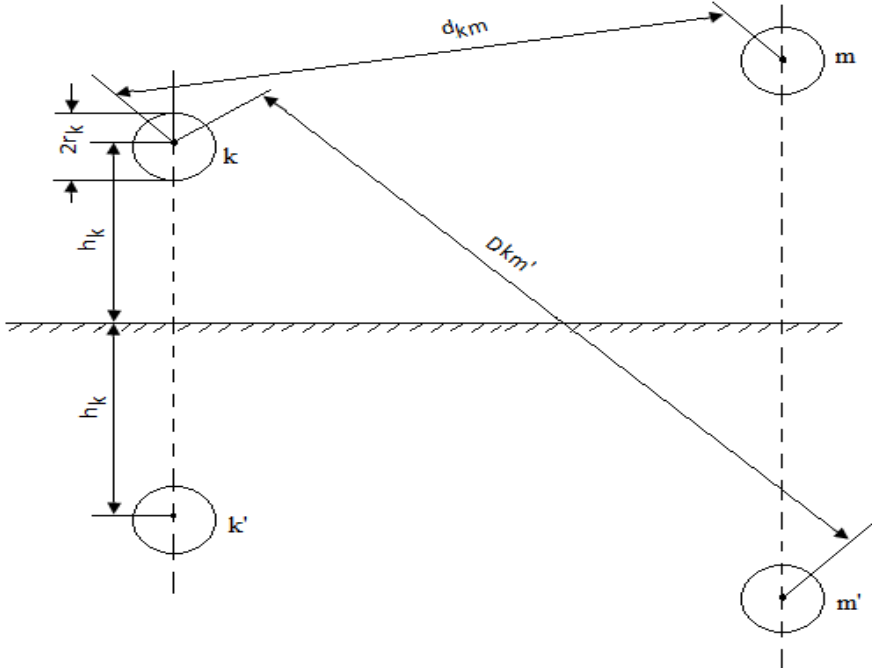


Şekil 1.31. Kapasitedeki gerilim grafiği (Тиняков.1982)

$t = \frac{T}{2}$ anında C kapasitesindeki maksimum gerilim, $4 u_i$ değerine eşit olur.

$t = \frac{T}{4}$ anında gerilim eğimi maksimum değerine ulaşır. Yani,

D_{km} - k'inci hatla m'inci hattın yere göre eksi arasındaki uzaklıktır. Bu parametreleri ifade eden durum Şekil 1.32'de gösterilmiştir.



Şekil 1.32. Parametreleri ifade eden durum (Тиняков.1982)

Denklem (1.107) ifadesinin sağ tarafındaki her bir bileşeni $\frac{V}{V}$ ile çarpılırsa, bu durumda,

$$\left. \begin{aligned}
 u_1 &= \alpha_{11}q_1 \frac{V}{V} + \alpha_{12}q_2 \frac{V}{V} + \dots + \alpha_{1n}q_n \frac{V}{V} \\
 u_2 &= \alpha_{21}q_1 \frac{V}{V} + \alpha_{22}q_2 \frac{V}{V} + \dots + \alpha_{2n}q_n \frac{V}{V} \\
 \dots & \\
 u_n &= \alpha_{n1}q_1 \frac{V}{V} + \alpha_{n2}q_2 \frac{V}{V} + \dots + \alpha_{nn}q_n \frac{V}{V}
 \end{aligned} \right\} \quad (1.110)$$

yazılabilir.

Burada:

v- Yürüyen dalganın yayılma hızıdır. Denklem (1.110) ifadesinde,

$q.v = i$ ve $\frac{\alpha}{v} = Z$ olduğu düşünülürse, bu durumda,

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= Z_{11}i_1 + Z_{12}i_2 + \dots + Z_{1n}i_n \\ u_2 &= Z_{21}i_1 + Z_{22}i_2 + \dots + Z_{2n}i_n \\ \dots & \\ u_n &= Z_{n1}i_1 + Z_{n2}i_2 + \dots + Z_{nn}i_n \end{aligned} \right\} \quad (1.111)$$

yazılabilir.

iki hatlı sistem için,

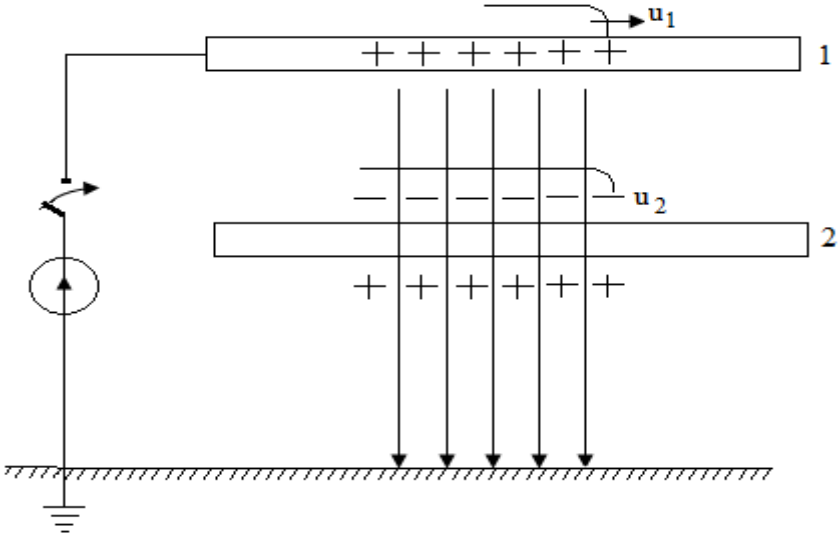
$$\left. \begin{aligned} u_1 &= Z_{11}i_1 + Z_{12}i_2 \\ u_2 &= Z_{21}i_1 + Z_{22}i_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.112)$$

yazılabilir. Burada:

$Z_{11} = Z_{22}$ olup hattın öz karakteristik empedansdır.

$Z_{12} = Z_{21}$ olup hattın karşılıklı karakteristik empedansdır.

Hatlardan 1 nolu hattın gerilim altında olduğu ve 2 nolu hattın ise açık olduğu varsayıldığı durum, Şekil 1.33'te verilmiştir.



Şekil 1.33. 1 nolu hat gerilim altında ve 2 nolu hat açık durumu (Тиняков.1982)

2 nolu hat açık olduğu için $i_2 = 0$ olur. Bu durumda Denklem (1.112) ifadesinden,

$$\left. \begin{array}{l} u_1 = z_{11}i_1 \\ u_2 = z_{21}i_1 \end{array} \right\} \quad (1.113)$$

yazılabilir.

Denklem (1.113) ifadesinden u_2 için,

$$u_2 = ku_1 \quad (1.114)$$

yazılabilir.

Burada,

$$k = \frac{z_{21}}{z_{11}} = \frac{\alpha_{21}}{\alpha_{11}} \text{ olup alaka katsayısıdır.}$$

Hatlar arasındaki mesafe küçüldükçe ve yerden olan mesafe arttıkça alaka katsayısının değeri artar. Hava hatları için alaka katsayısının değeri genelde $k = 0,2-0,3$ arasında değişmektedir. Karşılıklı karakteristik empedansın değeri ise $100-200 \Omega$ arasında değişmektedir.

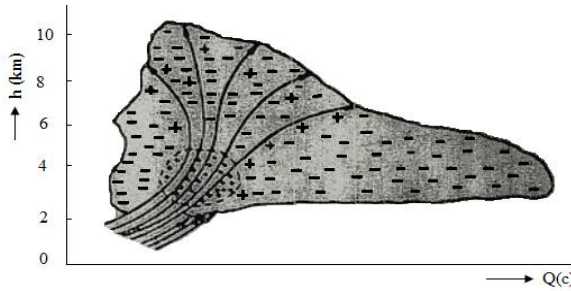
Şekil 1.33'deki durum için 1 nolu hattın gerilimi $u_1 = 220 \text{ kV}$ olduğunda alaka katsayısının değeri $k = 0,2$ alındığında 2 nolu hattın gerilimi $u_2 = 220 \cdot 0,2 = 44 \text{ kV}$ olur. Eğer $k = 0,3$ alınırsa, bu durumda $u_2 = 220 \cdot 0,3 = 66 \text{ kV}$ olur. Bu gerilim değeri çok tehlikelidir. Bundan dolayı 2 nolu hatta bir çalışma yapmadan önce mutlaka topraklama ayırıcılarının kapatılması gerekir.

BÖLÜM 2

YILDIRIM BOŞALMASI

2.1. Yıldırım Boşalmasının Yaşanması

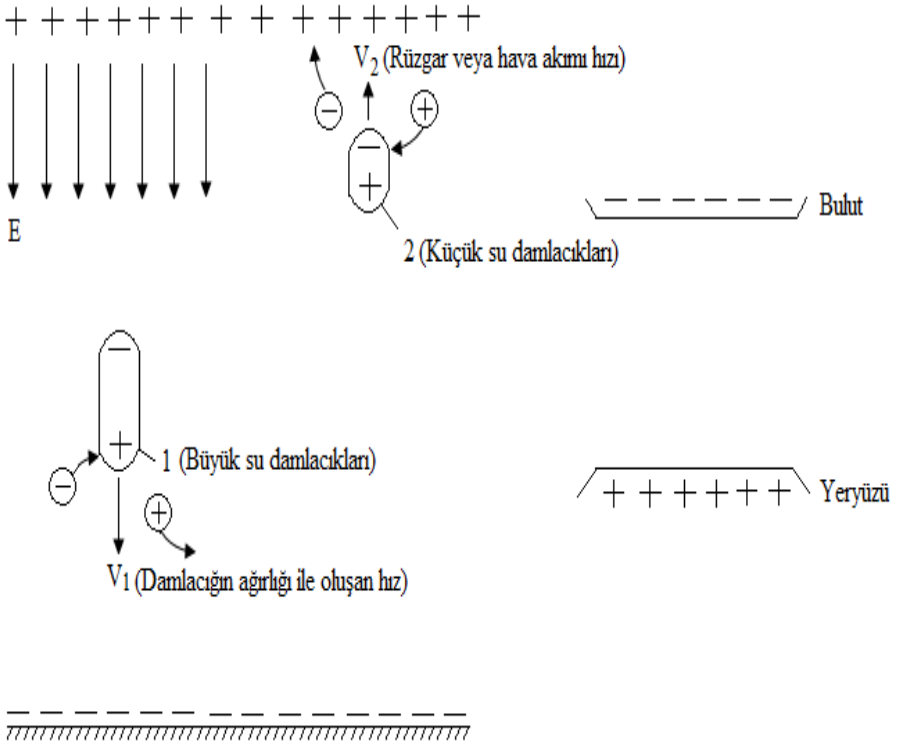
Uzun yıllardan beri yıldırımın büyük bir elektrik boşalması olduğu bilinmektedir. Yıldırım bulutunda elektrik yüklerinin teşekkülü hakkında birçok teori kurulmuştur. Bunlar; Simpson ve Lomonosow teorisi, Elster ve Geitel teorisi ile Frankel teorisi olarak sıralanabilir. Simpson ve Lomonosow teorisine göre, soğuk ve sıcak havanın yer değiştirmesi neticesinde bir yıldırım bulutunda elektrik yükleri oluşur. Oluşan hava akımları, bulut içindeki su damlacıklarının hareket etmesine neden olur. Bunun sonucunda su damlacıklarının sürtünmesiyle elektrik yükleri meydana gelir. Yıldırım bulutunun meydana gelmesi, gerçekte soğuk ve sıcak havanın sürekli ve kuvvetli bir şekilde yukarı yöne doğru çekilmesine bağlı olmaktadır. Belli bir yükseklik sonrasında, hava içindeki nem, ince su damlacıkları veya buz kristalleri şeklinde kendini gösterir. Kuvvetli hava akımları bulut içindeki, su damlacıklarının sürekli dağılmasına ve yeniden birleşmesine sebep olmaktadır. Simpson'a göre bir yıldırım bulutundaki elektrik yüklerinin dağılımı Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Yıldırım bulutunda elektrik yüklerinin dağılımı (Özkaya.1988)

Bu teoriye göre elektrik yüklerinin üretilmesi durumunda yıldırım boşalma durumlarının pozitif kutbiete olması gerekmektedir. Ancak, yıldırım boşalma durumlarının çoğunluğu negatif kutbiete olmaktadır.

Elster ve Geitel teorisine göre, yıldırım bulutu içindeki yükler tesirle elektriklenme ile oluşur. Dünya yüzeyinde bulunan elektrik yükü, $-5,4 \cdot 10^5$ C kabul edilmesi durumunda, bu yükün oluşturduğu elektrik alanındaki su damlacıkları, alt uçları (+) şekilde ve üst uçları (-) şekilde polarize olmaktadır. Bu durum, Şekil 2.2’de verilmiştir.



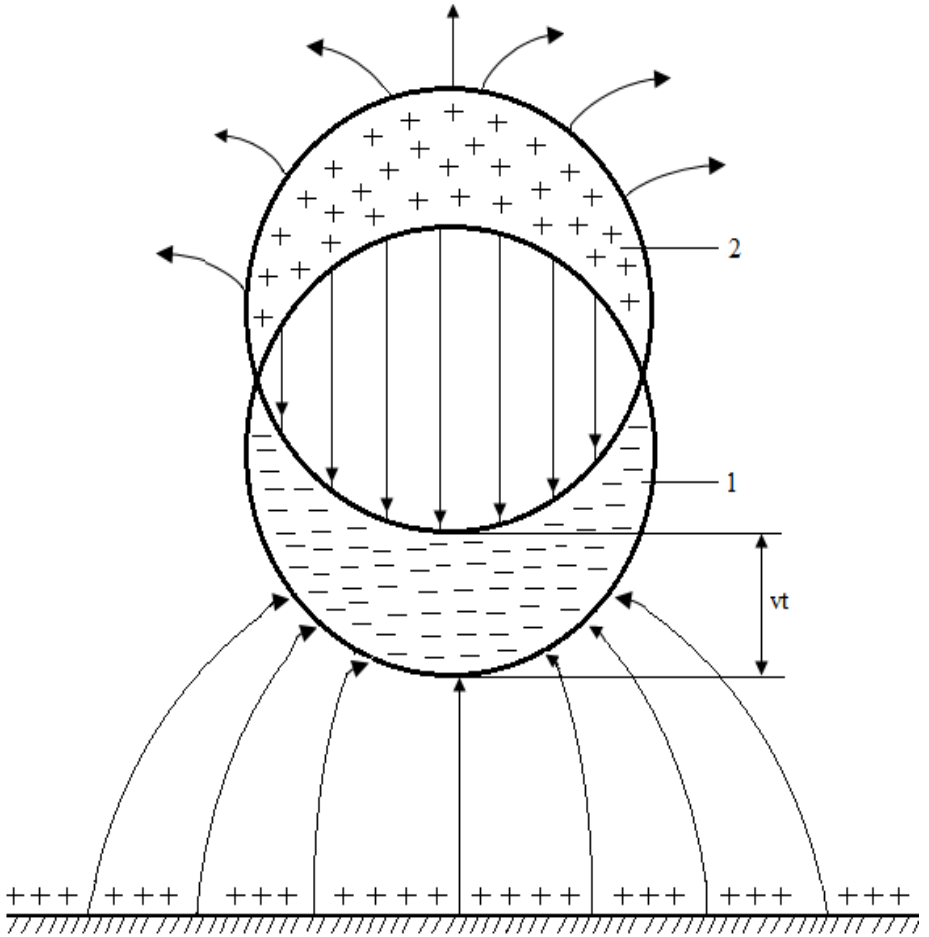
Şekil 2.2. Su damlacıklarının polarize olması durumu (Özkaya.1988)

Şekil 2.2’den görüleceği gibi ağır su damlacıkları ağırlığı nedeniyle yeryüzüne yaklaşırken alt kısımları hava iyonlarının “+” olanlarını iter, “-“ olanları ise çeker. Dolayısıyla toplam yükü negatif olur. Hafif su damlacığının alt kısmı yer yüzeyinin alanı nedeniyle “+”, üst kısmı ise “-“ yüklenir. Bu damlacıklar hava akımıyla yukarı doğru hareket ederken havanın pozitif iyonlarını çeker, negatif olanlarını ise iter. Sonuçta toplam yükü pozitif olur. Bu olay sonucunda yer yüzeyine yakın bulutların alt kısmı “-“, üst kısmı ise “+” yüklü olacaktır. Dolayısıyla bu teori, yıldırım boşalma durumlarının daha çok negatif kutbiyette sahip olduğunu açıklamaktadır.

Bulutun yarısından fazlası, su damlacıkları olmayıp buz kristalleri ve kar taneciklerinden meydana gelmektedir. Dolayısıyla bu bulutun dünyanın elektrik alanıyla polarize olmalarının çok zayıf bir ihtimal olduğunu söylemek mümkündür.

Frankel’e göre havadaki pozitif ve negatif işarete sahip iyonlar bulunması nedeniyle dünyada var olan (-) elektrik yükleri, kaçmaya ve iyonların (+) elektrik yükleriyle birleşmeye yakındır. Bu nedenle dünyanın azalan elektrik yükünü sürekli besleyecek bir olayın oluşması gerekir. Burada, pozitif ve negatif işarete sahip iyonları ihtiva eden havayla çok küçük su damlacıkları veya buz kristallerinden oluşan bir ortam dikkate alınmaktadır. Havada bulunan negatif iyonların daha fazla küçük su damlacıklarına veya buz kristallerine konduğu kabul edilmektedir. Bu durumda bulut, (-) elektrikli su damlacıkları ve (+) iyonlara karşılık olan (-) iyonlar su damlacıkları tarafından yutulmasıyla oluşan (+) iyonlu havadan

teşekkül eder. Etrafında bulunan havaya göre su damlacıkları daha ağırdır. Bu nedenle su damlacıkları, hızı birkaç mm/s'yi bulan bir V hızı ile aşağı doğru düşmektedir. Su damlacıklarının ve havanın iyonlarının ilk başta üst üste iki küresel bulut üzerinde olması kabul edilmesi durumunda, t süresinden sonra su damlacıklarına sahip küre, vt uzunluğu kadar aşağı doğru iner. Bu durum Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



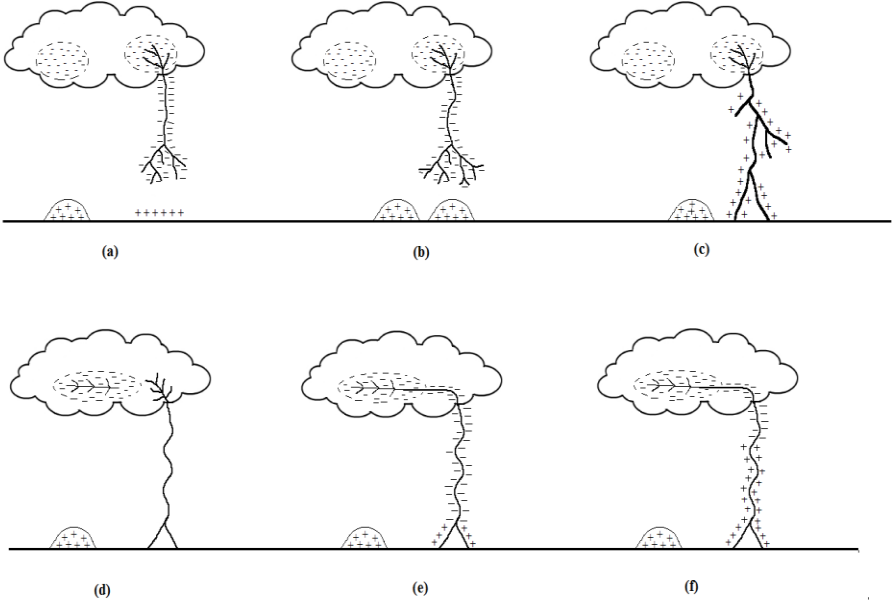
Şekil 2.3. Su damlacıklarını içeren küre (Özkaya.1988)

Burada:

- 1- Negatif su damlacıklarından teşekkül eden küredir.
- 2- Pozitif iyonlardan teşekkül eden küredir.

Şekil 2.3'ten görüleceği gibi bulutun üst kısmında havanın (+) yükleri ve alt kısmında da su damlacıklarının (-) yükleri hüküm sürer. Frankel'e göre bu şekilde bulutun polarizasyonu yer çekimi etkisiyle olur.

Çok kademeli bir yıldırım boşalmasının gelişme aşamaları Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Yıldırım boşalmasının gelişme aşamaları (Özkaya.1988)

Elektrik yükleri birbirinden ayrı merkezlerde toplanır. Yıldırım boşalmalarının %70 - %90'ı negatif kutbiyettir. Bundan dolayı bulutun yükü genelde negatif işaretli olur. Bulutun yükü negatif işaretli olduğu için bulutun karşısındaki yer yüzeyinde pozitif işaretli

yükler birikmeye başlar. Böylece negatif yüklü bulut - pozitif yüklü yer yüzeyi kondansatörü oluşmuş olur. Bu kondansatörde alan şiddetinin ortalama değeri 10 kV/m'ye kadar ulaşabilir. Yüklü bulutun elektrik yüklerinin yoğun olduğu ayrı ayrı merkezlerde alan şiddetinin değeri 25-30 kV/cm'ye kadar yükselebilir. Yıldırım kanalının genel uzunluğu birkaç km'ye ulaşabilir. Bu kanalın uzunluğunun bir kısmı da yüklü bulutun içerisinde olur. Bir yıldırım düşmesi zamanı aynı kanalla bir kaç boşalma oluşur. Birinci lider kanalının oluşma süresi $1,5 \cdot 10^5$ m/sn, sonraki boşalmalarda ise $2 \cdot 10^6$ m/sn olur. Ana boşalma kanalının oluşum hızı $1,5 \cdot 10^7$ - $1,5 \cdot 10^8$ m/sn arasında değişir. Lider kanalı aşamalı hareket eder. Her aşamanın uzunluğu 50 m, aşamalar arası süreler ise 30-90 μ sn arasında değişir. Yüklü bulutun ortalama potansiyeli 50 MV, ana boşalma kanalının yarıçapı ise birkaç santimetreye ulaşabilir. Kanaldaki alan şiddetinin ortalama değeri 0,15 kV/cm değerinde olur.

Elektrik alanı tesadüfen en büyük olan yük birikmesi halinde yıldırımın boşalması başlamaktadır. Toprağa birinci merkezin ön boşalması ulaşmadığı müddetçe, bu merkezin potansiyel değeri pratikte sabit kalır. Bu durumda bulut içinde bulunan yük merkezleri arasında karşılıklı bir etki bulunmamaktadır. Bulutun birinci yük merkezi ana boşalmanın ardından pratikte toprak potansiyeli seviyesinde olur. Boşalan 1. merkezle komşu merkez arasında potansiyel farkı artarak boşalma oluşur. Komşu merkezden 1. boşalmanın kanalına boşalmanın ulaşmasının ardından, oluşan yolda

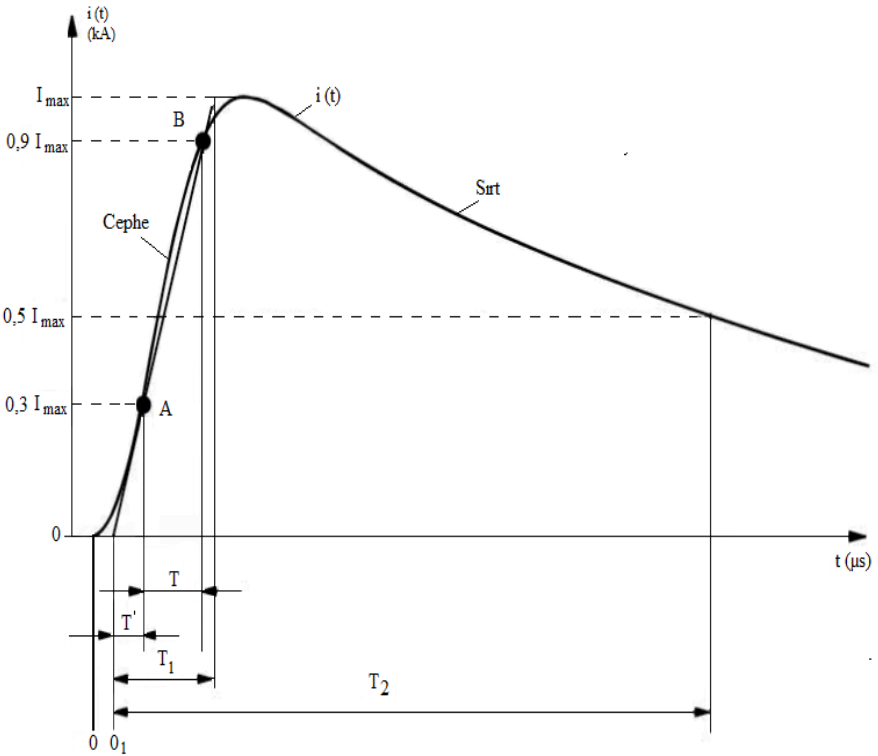
aşağı doğru bir ön boşalma meydana gelir. Bu ön boşalmanın önceden iyonize olmuş yol üzerinde yayılmasıyla bu durum açıklanmaktadır.

Ana boşalmanın en önemli karakteri, akım şiddetidir. Birim uzunluğa düşen yük yoğunluğu σ ve ana boşalma hızı V ile gösterilmesi durumunda boşalma akımı,

$$I = \sigma \cdot V \quad (2.1)$$

şeklindedir.

Ana boşalmanın ardından, buluta ait olan artık yükler kanal üzerinden toprağa akmaktadır. Yıldırım akımının değişimi Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Yıldırım akımı değişimi (Далгинов.1962)

Şekil 2.5'ten görüldüğü gibi yıldırım akımı, maksimum değerine çok hızlı bir şekilde yükselmekte ve maksimum değerden sıfır değerine genel olarak yükselme hızından daha az bir hızla düşen aperiyojik ve geçici bir doğru akımdır.

Burada:

I_{max} - Yıldırım akımının maksimum değeridir.

T_1 - Cephe süresidir. Cephe süresi, akımın maksimum değerinin %30 ve %90'nın olduğu anlar arasında olan T zamanının 1,67 katıdır. T_1 ile gösterilir. $T_1 = 1,67.T$ şeklindedir. Şekilde A ve B noktaları arası T 'ye karşılık gelmektedir. Standart bir dalga için $T_1 = 1,2\mu s$ 'dir. Ancak bazı kaynaklarda $T_1 = 1,5 \mu s$ alınmaktadır.

0_1 - Anma başlangıç noktasıdır. Şekil 2.5'teki A noktasından $0,3 T_1$ kadar önceki süreye karşı düşen absis üzerindeki noktadır. Zamanı lineer olarak değişen osilogramlarda bu nokta cephedeki A ve B noktalarını birleştiren doğrunun absis eksenini kestiği noktadır.

T_2 - Sırt yarı değer süresidir. Anma başlangıç noktası ile sırtta akımın tepe değerinin yarısına indiği ana karşı düşen nokta arasındaki süreye denir. Standart bir dalga için $T_2 = 50 \mu s$ 'dir. Ancak bazı kaynaklarda $T_2 = 40 \mu s$ alınmaktadır.

$i(t)$ akımı,

$$i(t) = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2.2)$$

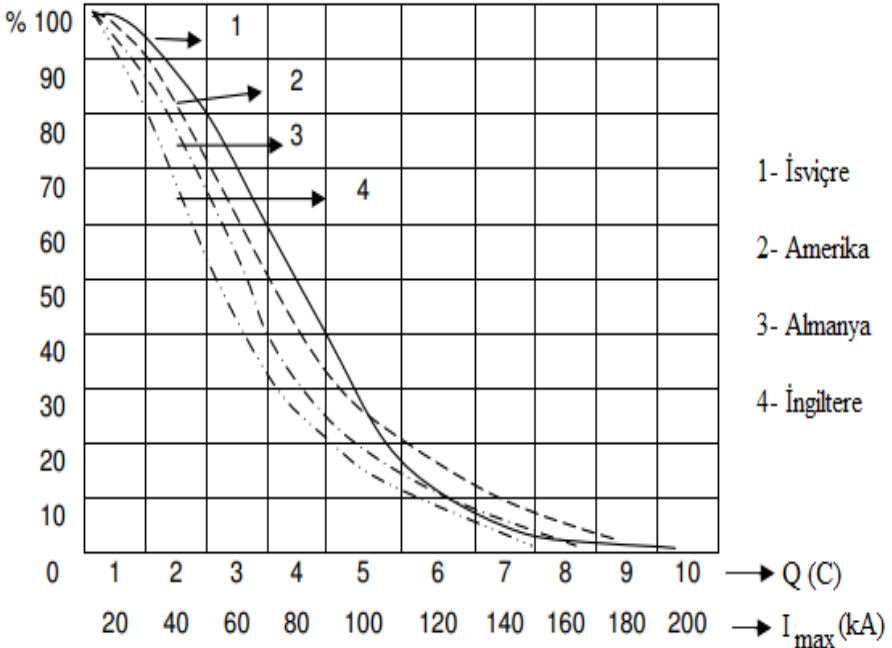
şeklindedir. Yıldırım akımı ile yük arasında,

$$Q = 50.10^{-6} \cdot I_{max} \quad (2.3)$$

bağıntısı yazılabilir.

Bir yıldırımın karakteristik büyüklükleri olarak, kutbiyeti, dalga şekli ve yıldırım akımının tepe değeri sayılabilir. Yıldırım boşalmasının kutbiyeti, pozitif veya negatif olabilir. Toplam yıldırım sayısının %70 ile %90'ı negatif kutbetlidir.

Tek bir yıldırım tarafından toprağa akan elektrik yükü iki kısımdan oluşur. Yükün birinci kısmı, ana boşalma sırasında toprağa geçer. Bu, kanalda depo edilen yükü gösterir. Bundan sonra bulutta kalan artık yükler, ana boşalmanın iletken kanalı üzerinden toprağa geçerler. İyi topraklanmış bir objeye düşen yıldırım akımının tepe değeri birçok araştırmacı tarafından ölçülmüştür. Yıldırım akımının birikmeli olasılık eğrileri Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Yıldırım akımlarının birikmeli olasılık eğrileri (Özkaya.1988)

Şekil 2.6'daki eğrilere dikkate alındığında, yıldırım akımlarının oldukça geniş sınırlar içinde değiştiği görülmektedir. Daha fazla oluşmalar 20 kA'ın altında olan akımlardır. 20 kA değerinden yüksek olan akımlara çok az rastlanmaktadır.

Bir gündeki yıldırımın ortalama devam etme süresi, $1,5 \div 2$ saat kabul edilir. Bu durumda bir yıldırımın devam etme süresi için,

$$N_{\text{yıl.saat}} = (1,5 \div 2) N_{\text{yıl.gün}} \quad (2.4)$$

yazılabilir.

Burada:

$N_{\text{yıl.gün}}$ – Bir yıldırımın toplam yıldırım günlerinin sayısıdır. Kuzay bölgelerinde bir yıldırımın yıldırım günlerinin sayısı, $5 \div 10$ gündür. Güney bölgelerinde yıldırım günlerinin sayısı, $30 \div 35$ gündür. Kafkas bölgelerinde ise yıldırım günlerinin sayısı, $40 \div 50$ gündür.

Yıldırım karşı koruma elemanlarının seçiminde başlangıç parametresi olarak gerilim değil, yıldırım akımı kabul edilir.

Bunun nedeni, yıldırım akımının ölçmenin mümkün olmasına bağlıdır. Ayrıca yıldırım akımının dikliğini de tayin etmek mümkündür. Çok sayıda yapılan ölçmelerden yararlanarak bu veya diğer tepe değerine sahip yıldırım akımının oluşması olasılığı,

$$P_1 = e^{-\frac{I_m}{26}} = 10^{-\frac{I_m}{60}} \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Burada:

I_m – Yıldırım akımının tepe değeridir. Eğer $I_m = 60$ kA kabul edilirse, bu durumda $P_I = 0,1$ olur. Buradan da 10 yıldırım düşmesinin sadece birinde yıldırım akımının tepe değeri 60 kA olduğu anlaşılmaktadır. Bu veya diğer dikliğe sahip yıldırım akımının oluşması olasılığı,

$$P_a = e^{-\frac{a}{15,7}} = 10^{-\frac{a}{36}} \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Eğer $a = 36$ kA/ μ s kabul edilirse, bu durumda $P_a = 0,1$ olur. Buradan da 10 yıldırım düşmesinin sadece birinde yıldırım akımının dikliğinin 36 kA/ μ s olduğu anlaşılmaktadır.

Bu veya diğer tepe değerine ve dikliğe sahip yıldırım akımının oluşması olasılığı,

$$P_{I,a} = 10^{-\left(\frac{I_m}{60} + \frac{a}{36}\right)} \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Eğer $I_m = 60$ kA, $a = 36$ kA/ μ s kabul edilirse, bu durumda $P_{I,a} = 0,01$ olur. Buradan da 100 yıldırım düşmesinin sadece birinde yıldırım akımının tepe değeri 60 kA, dikliği ise 36 kA/ μ s olduğu anlaşılmaktadır.

Bir yıldırım saati süresinde yerin 1 km²'lik yüzeyine ortalama olarak 0,07 darbe olur. Enerji iletim hatları yıldırımını yaklaşık olarak 6h_{or} olan

koridorda kabul eder. Bu durumda bir yılda enerji iletim hattına olan darbe sayısı için,

$$N_{\text{yıl.dar}} = 0,07 \cdot 6h_{\text{or}} \cdot l_{\text{hat}} \cdot 10^{-3} N_{\text{yıl.saar}} \quad (2.8)$$

yazılabilir. Burada:

h_{or} – Metre (m) cinsinden enerji iletim hattının yerden olan ortalama yüksekliğidir.

l – Kilometre (km) cinsinden enerji iletim hattının uzunluğudur.

Eğer $l = 100$ km ve $N_{\text{yıl.saar}} = 100$ saat kabul edilirse, bu durumda,

$$N_{\text{yıl.dar}} = 100 \cdot 4h_{\text{or}} \quad (2.9)$$

elde edilir.

2.2. Yıldırım Akımının Etkileri

Bir yıldırım, madeni yapılara düşerse, bu yapılardan büyük bir akım geçer. Yıldırım akımı I_y topraklanmış bir objeden örneğin enerji iletim hatlarının direklerinden geçtiğinde $U_T = I_y \cdot R_T$ 'ye eşit gerilim düşümü oluşur. Yıldırım akımının elektromanyetik alanı yakınlıkta olan hatlarda ve diğer iletim yapılarında elektro motor kuvvet (emk) endükler. U_T gerilim düşümü yıldırım akımının elektromanyetik alanının endüklediği emk ile birlikte $100 \div 1000$ kV'a kadar aşırı gerilim oluşturur. Bu da doğrudan doğruya yıldırım düşmesi sonucunda oluşan aşırı gerilim olarak adlandırılır. R_T direnci, hem yıldırım düşen objenin topraklama direnci, hem de yıldırım düşen

hattın karakteristik empedansı olabilir. Bu durumda yıldırım, topraklama direnci küçük olan objeye düştüğünde oluşan aşırı gerilim $U_y = I_y \cdot Z$ şeklinde olur.

Yıldırım düşen objenin karakteristik empedansı çok büyük olduğunda bu empedansın hesaba katılması gerekir. Yıldırım kanalının karakteristik empedansını Z_y olarak adlandırıldığında, yıldırım düşen objeden geçen akım,

$$I'_y = I_y \cdot \frac{Z_y}{R_T + Z_y} \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Yıldırımın karakteristik empedansını, $Z_y = 100 \div 250 \Omega$ arasında olur. Yıldırım düştüğü yerlerde madeni kısımlar eriyebilir.

Ayrıca, elektrodinamik zorlamalar dolayısıyla akım ileten paralel kısımlar birbirlerine yaklaşır. Yıldırımın elektrik tesisleri için ana tehlikesini aşırı gerilimler oluşturur. Aşırı gerilimler atlamalara ve tesisatın yalıtımının arızalanmasına neden olabilirler.

BÖLÜM 3

DIŞ AŞIRI GERİLİMLER

3.1. Faz Hattına Yıldırımın Düşmesi

İki bulut arasında meydana gelen elektriksel deşarjın (yıldırım) bir faz hattına düşmesi durumunda, düştüğü noktadan her iki yönde ilerleyen (yürüyen) dalga oluşur. $i(t) = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ olarak yıldırım akımı ifade edildiğine göre yürüyen gerilim dalgası,

$$u(t) = \frac{1}{2} Z i(t) = \frac{1}{2} Z i_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) = u_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (3.1)$$

şeklindedir.

Burada:

Z - faz hattına ait karakteristik empedanstır.

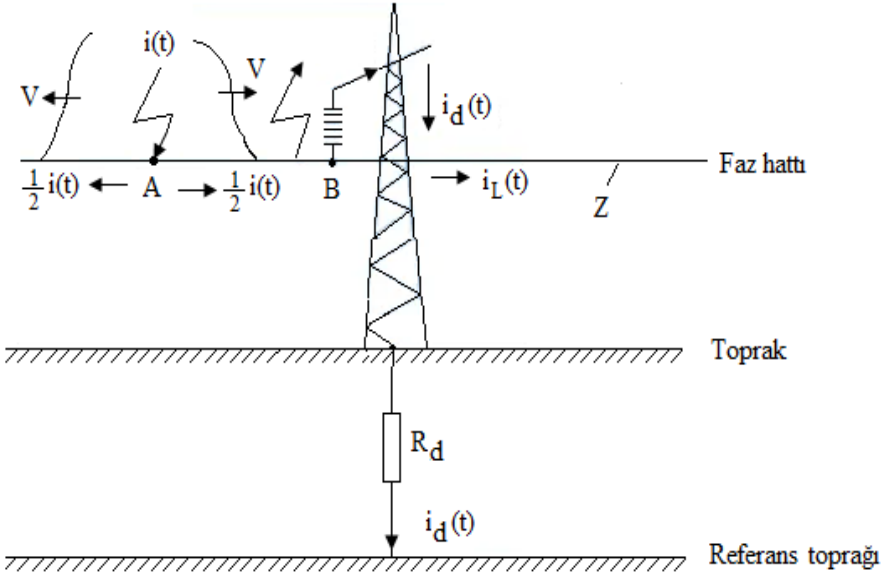
$u_0 = \frac{ZI_0}{2}$ değerini gösterir.

Faz hattına ait karakteristik empedansı $Z = 300 \Omega$ olan hatta düşen yıldırımın maksimum değeri, $I_m = 20 \text{ kA}$ ise, faz hattında oluşan aşırı gerilimin maksimum değeri,

$$U_m = \frac{1}{2} Z I_m = \frac{1}{2} \cdot 300 \cdot 20 = 3000 \text{ kV}$$

olarak bulunur.

Maksimum değeri bu kadar büyük olan bir ilerleyen gerilim dalgası, geldiği ilk direktte izolatör zinciri üzerinden bir atlama oluşturur. Buna ilişkin şematik gösterim, Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Yürüyen gerilim dalgasının atlama durumu (Özkaya.1988)

Topraklayıcıdan yeteri miktarda uzak olan ve topraklama tesisinin etki alanının dışındaki yeryüzü bölümüne referans toprağı denilmektedir. Direkte meydana gelen gerilim,

$u_d \cong R_d \cdot i_d = z \cdot i_L$ ve $\frac{1}{2}i = i_d + i_L$ denklemleri yardımıyla

$$u_d \cong \frac{1}{2} i \frac{R_d Z}{R_d + Z} \quad (3.2)$$

şeklinde yaklaşık olarak hesaplanabilir.

Burada:

R_d - Direğin topraklama direncidir. Gerçekte u_d için,

$$u_d = R_d \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - u_k - M \frac{di_L}{dt} \pm u_\varphi \quad (3.3)$$

ifadesi yazılabilir.

Burada:

$R_{d.i_d}$ - Topraklama direncinde oluşan gerilim düşümüdür.

$L_d \frac{di_d}{dt}$ - Direğin endüktansında oluşan endüktif gerilim düşümüdür.

u_k -Faz hattı ile koruma hattı arasında bulunan kapasitif kuplaj nedeniyle, koruma hattının faz hattında meydana getirdiği gerilimdir.

$M \frac{di_L}{dt}$ - Faz hattında ilerleyen yıldırım akımından dolayı direkte endüklenen gerilimdir.

$u_{\text{ş}}$ - Şebekedeki ani gerilim değeridir.

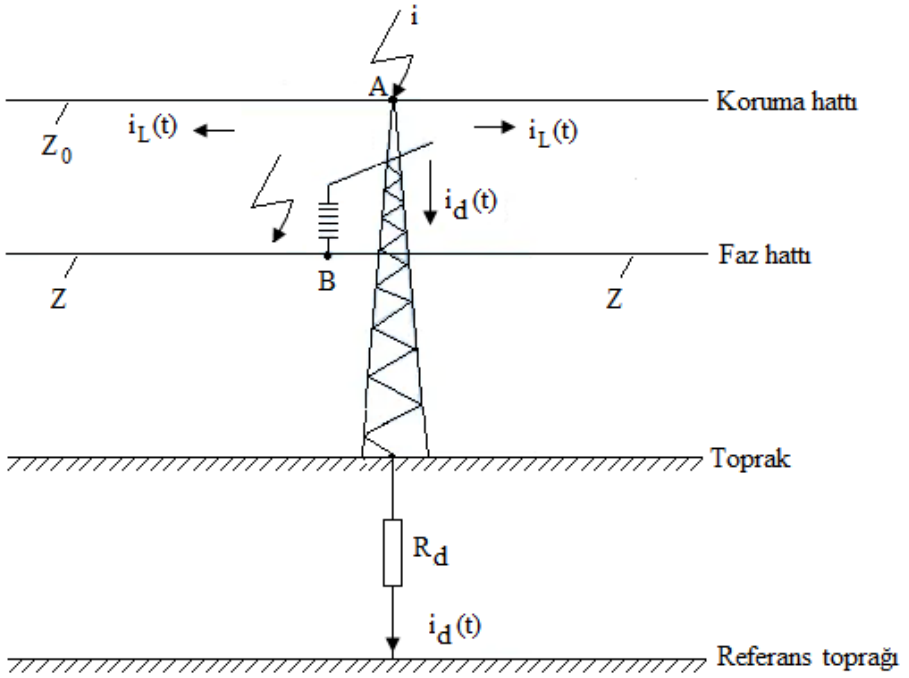
Direğin darbe topraklama direncindeki gerilim düşümü olan $R_{d.i_d}$ yanında diğer terimler çok küçük olmasından dolayı ihmal edilebilir. Bu durumda direkte meydana gelen gerilim,

$$u_d = R_{d.i_d} \quad (3.4)$$

şeklinde olur.

3.2. Direğe Yıldırımın Düşmesi

Direğe yıldırımın düşmesi, Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Direğe yıldırımın düşmesi (Özkaya,1988)

Direğe yıldırımın düşmesi durumunda aşırı gerilimler meydana gelir. Şekil 3.2'den ,

$$i = i_d + 2i_L \quad (3.5)$$

$$u_d = R_d \cdot i_d = Z_0 \cdot i_L \quad (3.6)$$

ifadeleri yazılabilir.

Direkte meydana gelen gerilim yükselmesi, R_d ve $Z_0/2$ paralel bağlı olarak düşünülerek;

$$u_d = \frac{R_d Z_0}{2R_d + Z_0} \cdot i \quad (3.7)$$

ifadesinden hesaplanabilir.

Burada:

R_d - Topraklama direncidir.

Z_0 - Koruma hattı için karakteristik empedanstır.

$Z_0 = 400 \Omega$; $I_m = 200 \text{ kA}$; $R_d = 10 \Omega$ ise, direkte meydana gelen aşırı gerilimin maksimum değeri,

$$U_{dm} = \frac{10 \cdot 400}{20 + 400} \cdot 20 \cong 200 \text{ kV}$$

olarak bulunur.

$R_d = 100 \Omega$ olduğunda ise,

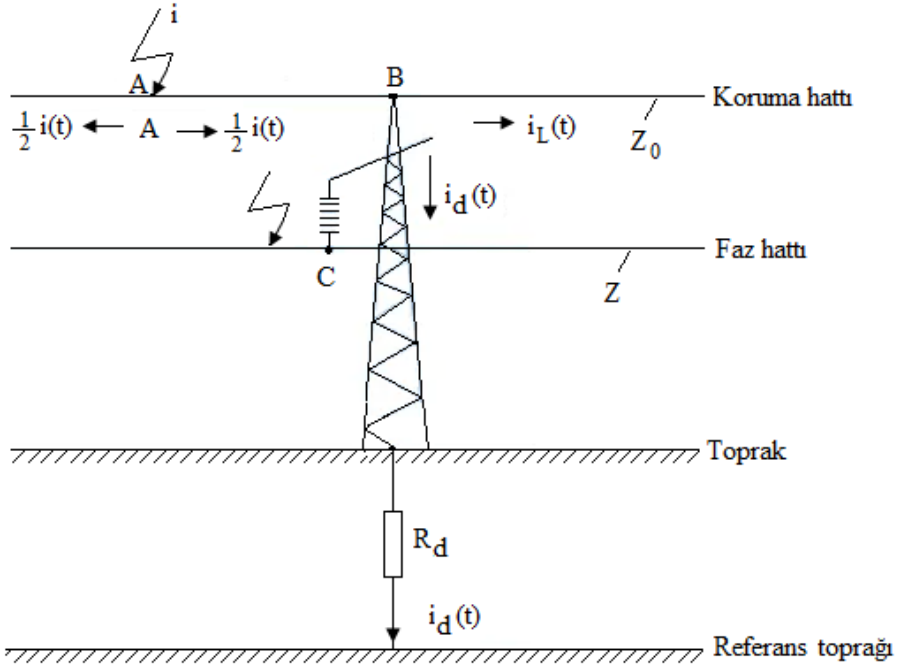
$$U_{dm} = \frac{100 \cdot 400}{200 + 400} \cdot 20 \cong 1333 \text{ kV}$$

olarak bulunur.

Maksimum değeri bu kadar büyük olan bir yürüyen gerilim dalgası direktten faz hattına doğru izolatör üzerinden bir “geri atlama” oluşturarak yüksek gerilim elektrik şebekesinin arızalanmasına sebep olmaktadır.

3.3. Koruma Hattına Yıldırımın Düşmesi

Koruma hattına yıldırımın düşmesi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Koruma hattına yıldırımın düşmesi (Özkaya.1988)

Koruma hattına yıldırımın düşmesi durumunda aşırı gerilimler oluşabilir. Enerji iletim hattında bulunan direklerin iyi topraklanmaması durumunda, direğe yıldırımın düşmesi durumunda olduğu gibi burada da bir “geri atlama” söz konusu olmaktadır. Şekil 3.3’ten,

$$\frac{1}{2} i = i_d + i_L \quad (3.8)$$

$$u_d = R_d \cdot i_d = Z_0 \cdot i_L \quad (3.9)$$

ifadeleri yazılabilir. Elektrik direğinde oluşan aşırı gerilimin tepe değeri, R_d ve Z_0 paralel bağlı olarak düşünülerek;

$$U_{dm} = \frac{R_d Z_0}{2(R_d + Z_0)} I_m \quad (3.10)$$

ifadesinden hesaplanabilir.

Burada:

R_d - Topraklama direncidir.

Z_0 - Koruma hattı için karakteristik empedanstır.

$Z_0 = 400 \Omega$; $I_m = 20 \text{ kA}$; $R_d = 100 \Omega$ ise, direkte meydana gelen aşırı gerilimin maksimum değeri,

$$U_{dm} = \frac{100 \cdot 400}{2(100 + 400)} \cdot 20 = 800 \text{ kV}$$

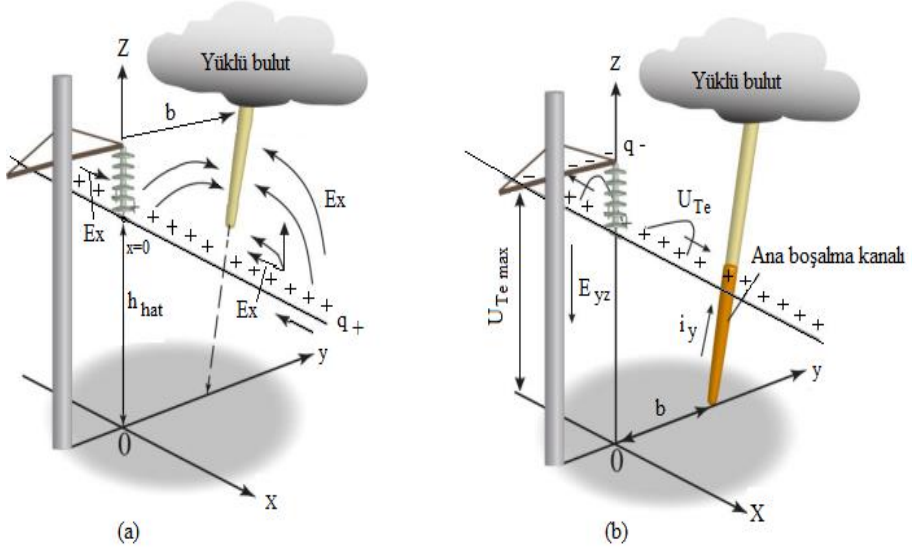
olarak bulunur.

Bulunan gerilim, izolatörün darbe atlama gerilim değerinden büyük olması durumunda izolatörde bir geri atlama oluşur. Bu geri atlama, yüksek gerilim şebekesinde arızalanmalara neden olabilir.

3.4. Tesirle Elektriklenme Suretiyle Oluşan Aşırı Gerilimler

Yıldırımın enerji iletim hattı (EİH)'nın yakınlığında toprağa düşmesi sonucunda da aşırı gerilim oluşur. Tesirle elektriklenme yoluyla aşırı gerilimin oluşması, Şekil 3.4'te verilmiştir. Bilindiği gibi buluttan negatif yükler toprağa doğru yaklaşık $2 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$ hızla ilerlemektedir. Yükler buluttan toprağa doğru ilerledikçe hattın uzak noktalarından $x=0$ noktasına pozitif yükler gelmeye başlar. Bu pozitif yükler ilk anda hareketsiz olurlar. Bunun nedeni hattın her bir noktasına E_x elektrik alanının etki etmesidir. Bu durum, Şekil 3.4a'da verilmiştir. Yıldırım boşalmasının ana kanalı oluşuktan sonra E_x elektrik alanı

söner. Bunun sonucunda elektrik yükleri hat boyunca her iki yönde hareket etmeye başlar. Bu olay, Şekil 3.4b’de verilmiştir.



Şekil 3.4. Tesirle elektriklenme yoluyla aşırı gerilimin oluşması (Тиняков.1982 ve Дерюгина.2020)

Yüklerin hat boyunca her iki yönde hareket etmesi sonucunda EİH’da tesirle elektriklenme suretiyle aşırı gerilim oluşur. Bu gerilimin genliği aşağıdaki ampirik formül ile ifade edilir.

$$U_m = K_o \frac{60 \cdot I_m \cdot h_{or}}{b} \quad (3.11)$$

$K_o = 0,6$; $b = h_{or}$ olursa, bu durumda aşırı gerilimin genliği;

$$U_m = 12 I_m \quad (3.12)$$

olur.

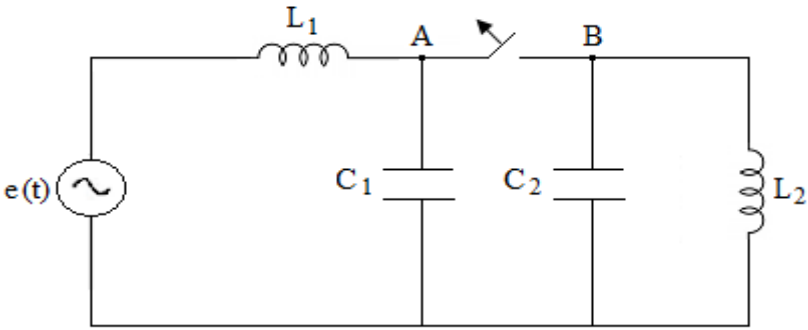
Maksimum değeri bu kadar büyük olan bir ilerleyen gerilim dalgası, ilk direkte izolatör zinciri üzerinden bir atlama yapar. Bu durum yüksek gerilim şebekesinin arızalanmasına neden olur.

BÖLÜM 4

İÇ AŞIRI GERİLİMLER

4.1. Endüktif Devrelerin Açılmasından Oluşan Aşırı Gerilimler

Endüktif bir devrenin (yüksüz bir transformatörün) açılması, Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Endüktif bir devrenin açılması ((Тиняков.1982)

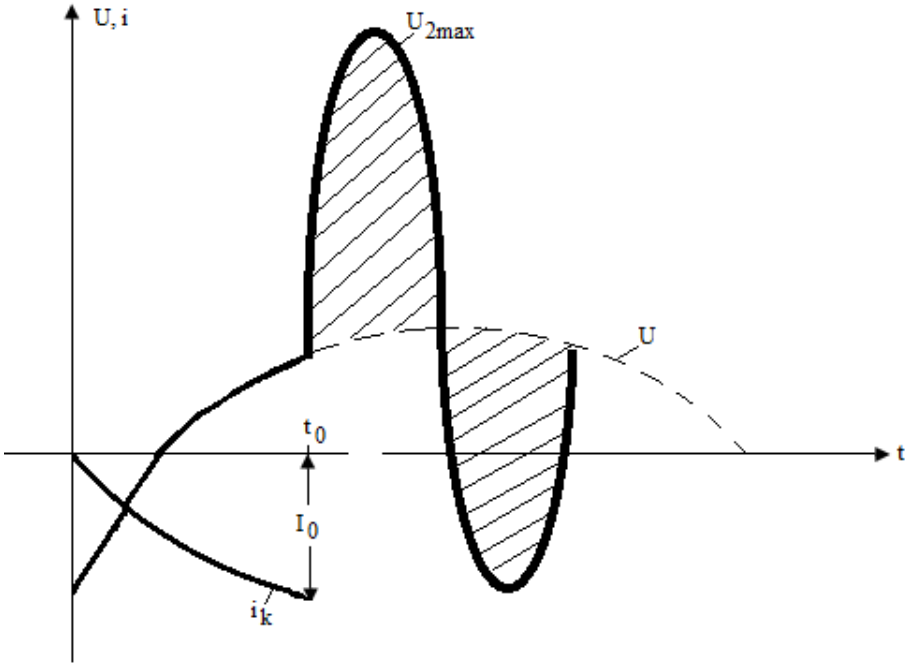
Burada:

L_1 ve C_1 - Kaynağın uygun parametreleridir.

L_2 ve C_2 - Yüksüz açılacak transformatörün parametreleridir.

Büyük akımların açılmasında yani kısa devre akımlarının açılmasında akım sıfırdan geçtiğinde devre açılır. Bu durumda kesicinin kontakları arasındaki ark söner.

Pratikte küçük değerli akımların açılmasında örneğin boştaki çalışan transformatörlerin açılmasında kesicinin kontakları arasındaki akımın sıfır olmayan değerlerinde de açma işlemlerinin gerçekleştirilmesi mümkündür. t_0 anında akım I_0 değerine ulaştığında devrenin açıldığını varsayalım. Bu durum, Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Devrenin açılma durumu ((Тиняков.1982)

Devre açıldıktan sonra manyetik enerji $\frac{L_2 I_0^2}{2}$, C_2 kondansatöründeki $\frac{C_2 U_0^2}{2}$ elektrik enerjisine dönüşecektir. Bu olay, aşağıdaki ifade ile karakterize edilir.

$$\frac{C_2 U_{2\max}^2}{2} = \frac{C_2 U_0^2}{2} + \frac{L_2 I_0^2}{2} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1) ifadesinden de beklenen aşırı gerilimin tepe değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$U_{2\max} = \sqrt{U_0^2 + \frac{L_2}{C_2} \cdot I_0^2} \quad (4.2)$$

Burada:

U_0 – t_0 anında C_2 kondansatöründeki gerilimdir.

I_0 – açma akımının değeridir.

$I_0 = 10 \div 20$ A arasında alınabilir.

Denklem (4.2) ifadesinden görüleceği gibi açma yerindeki aşırı gerilimin değeri I_0 açma akımı ve L_2/C_2 'ye bağlı olarak değişmektedir. Transformatörler büyük değerli endüktansa ve küçük değerli kapasiteye sahip olduklarından, transformatörler yüksüz olarak açıldıklarında büyük değerli aşırı gerilimler oluşabilir.

Örnek 4.1:

Yüksüz olarak açılacak olan transformatöre ait bilgiler; $U_n = 110$ kV, $S_n = 31500$ kVA, $L_2 = 50$ H, $C_2 = 10^{-8}$ F, $I_0 = 10$ A ve $t_0 = 0$ anında C_2 kondansatöründeki gerilim $U_0 = 0$ kV olarak bilinmektedir. Bu transformatörün yüksüz açılması durumunda oluşabilecek aşırı gerilimin tepe değerini bulunuz.

Çözüm 4.1:

$$U_{2\max} = \sqrt{U_0^2 + \frac{L_2}{C_2} \cdot I_0^2}$$

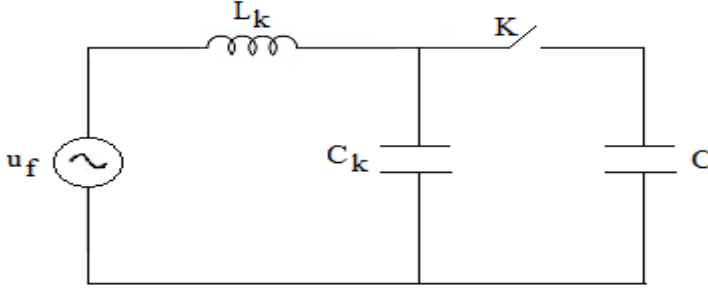
$$U_{2\max} = \sqrt{\frac{50}{10^{-8}} + 10^2} = \sqrt{50 \cdot 100 \cdot 10^8} = \sqrt{5000 \cdot 10^8} = 70,710678 \cdot 10^4 \text{ v}$$

$$U_{2\max} \cong 707,108 \text{ kV}$$

4.2. Kapasitif Devrelerin Açılmasından Oluşan Aşırı Gerilimler

Bu tür aşırı gerilimler, kondansatör bataryalarının ve boшта çalışan uzun enerji iletim hatlarının açılmasından oluşmaktadır. Önce

kondansatör bataryalarının açılmasını inceleyelim. Kondansatör bataryalarının açılması Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Kondansatör bataryalarının açılması durumu (Тиняков.1982)

Kesicinin kontakları kapalı iken devreden geçen akım, kapasitif akımdır. t_1 anında devre açıldığında kontaklar arasında oluşan ark söner ve devre kaynaktan açılmış olur. Bu durumda C kapasitesinde “+” u_f gerilimi kalmış olur. Yarım periyottan sonra kaynağın gerilimi “-” u_f olur. Bu durumda kesicinin kontakları arasındaki gerilim, Denklem (4.3)’deki gibi olur.

$$u_k = u_f - (-u_f) = 2u_f \quad (4.3)$$

Bu gerilimin etkisinden kontaklar arasında yeniden ark oluşur. “+” u_f gerilimine kadar şarj olmuş kondansatörün gerilimi değişerek “-” u_f olmalıdır. Bunu kaynak gerektirir. Fakat gerilimin bu değişimi ani olarak değil bir titreşim şeklinde oluşur. Bu titreşimin frekansı,

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_k(C_k + C)}} \quad (4.4)$$

şeklindedir.

Titreşim sonucunda geçiş olaylarından dolayı aşırı gerilimler oluşur. Bu aşırı gerilimin genliği (titreşim genliği),

$$u_{tit} = u_{kar} - u_{baş} = -u_f - (+u_f) = -2u_f \quad (4.5)$$

olduğundan

$$u_{max} = u_{kar} - u_{tit} = -u_f + (-2u_f) = -3u_f \quad (4.6)$$

olur.

Burada:

u_{kar} – kararlaşmış gerilimi ifade etmektedir.

$u_{baş}$ – Başlangıç gerilimi ve u_{max} kesicinin kontakları arasına etki eden maksimum gerilimi göstermektedir.

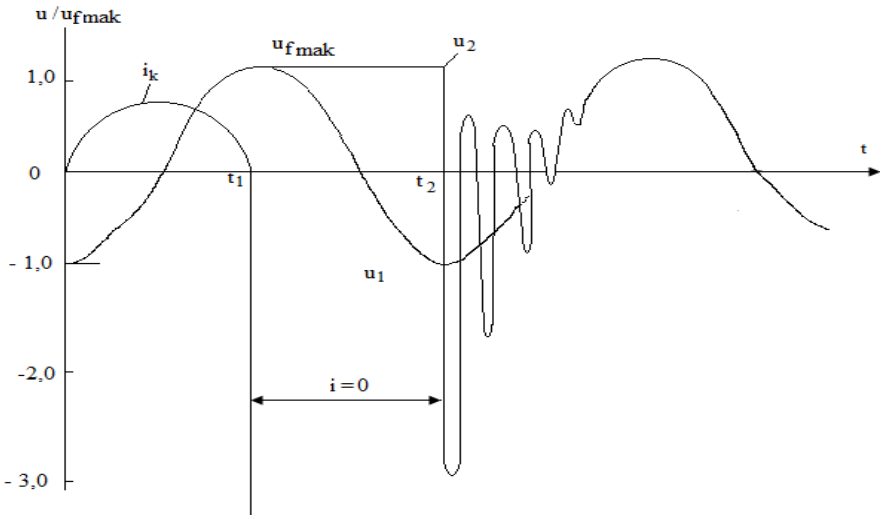
Akım sıfır değerinden geçtiğinde kesicinin kontakları arasındaki ark söner. Bu durumda C kondansatörü kaynaktan açılmış olur. C kondansatöründe “-” $3u_f$ gerilimi kalmış olur. Yarım periyottan sonra kaynağın gerilimi “+” u_f olur. Bu durumda,

$$u_{tit} = u_{kar} - u_{baş} = u_f - (-3u_f) = 4u_f \quad (4.7)$$

$$u_{max} = u_{kar} + u_{tit} = +u_f + (4u_f) = 5u_f \quad (4.8)$$

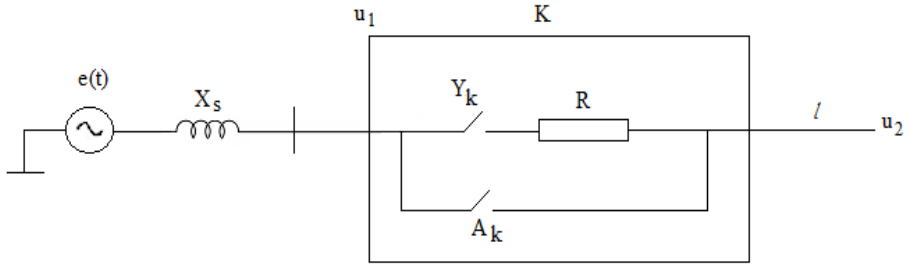
olur.

Teorik olarak yukarıdakine benzer şekilde C kondansatöründeki gerilimin artması gerekir. Fakat günümüzdeki kesicilerde devre açıldıktan sonra kesicinin kontakları arasında arkın tekrar yanmasına izin verilmemektedir. Bundan dolayı oluşabilecek aşırı gerilimin değeri $(2,5-3) u_f$ ’ı aşmamaktadır. Kesicinin kontakları arasında arkın tekrar yanmasından dolayı oluşan geçiş olayları Şekil 4.4’te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Kesicinin kontakları arasındaki geçiş olayları (Далгинов.1962)

Uzun enerji iletim hatlarının yüksüz açılması durumunda kondansatör bataryalarının devreden açılmasına benzer şekilde aşırı gerilim oluşmaktadır. Bu tür aşırı gerilimi önlemek için kesicilerin kontakları Şekil 4.5'te gösterildiği gibi olmalıdır.



Şekil 4.5. Aşırı gerilimi önlemek için kesicilerin kontaklarının durumu (Далгинов.1962)

Burada:

X_s - Sistemin reaktansıdır.

K- Kesicidir,

A_k – Kesicinin ana kontağıdır.

Y_k – Kesicinin yardımcı kontağıdır.

R- Akım sınırlayıcı dirençtir.

Devre açıldığında önce ana kontak (A_k) açılır. Bu durumda enerji iletim hattı R direnci üzerinden devreye bağlı kalır. R direnci gerilimin genliğini düşürdükten sonra yardımcı kontak (Y_k) açılır. Böylece olası aşırı gerilim önlenmiş olur. Enerji iletim hattını devreye almak gerektiğinde önce yardımcı kontak (Y_k), daha sonra ana kontak (A_k) kapatılır.

4.3. Senkron Genaratörün Yükünün Kalkmasından Oluşan Aşırı Gerilimler

Herhangi bir sebeple senkron generatörün aniden boşa çalışma konumuna alınması durumunda, gerilim regülatörü çalışıncaya kadar generatörün uç geriliminde bir yükselme olur. Eğer generatöre bağlı bir enerji iletim hattı varsa, bu durumda enerji iletim hattında geçici olarak bir gerilim yükselmesi oluşur. Bilindiği gibi, sürekli çalışmada generatörün uçlarındaki U gerilimi ile E e.m.k arasında,

$$E = U + (R + jX_d).I \quad (4.9)$$

bağıntısı vardır. R direncinin ihmal edilmesiyle,

$$E = U + jX_d.I \quad (4.10)$$

denklemini yazılabilir.

Burada:

I – Bir faz sargısından geçen akımdır.

Xd- faz sargısının senkron reaktansıdır. Generatörün yükü kalktığında I akımı sıfıra eşit olur ($I = 0$). Bu durumda,

$$E = U \quad (4.11)$$

olur.

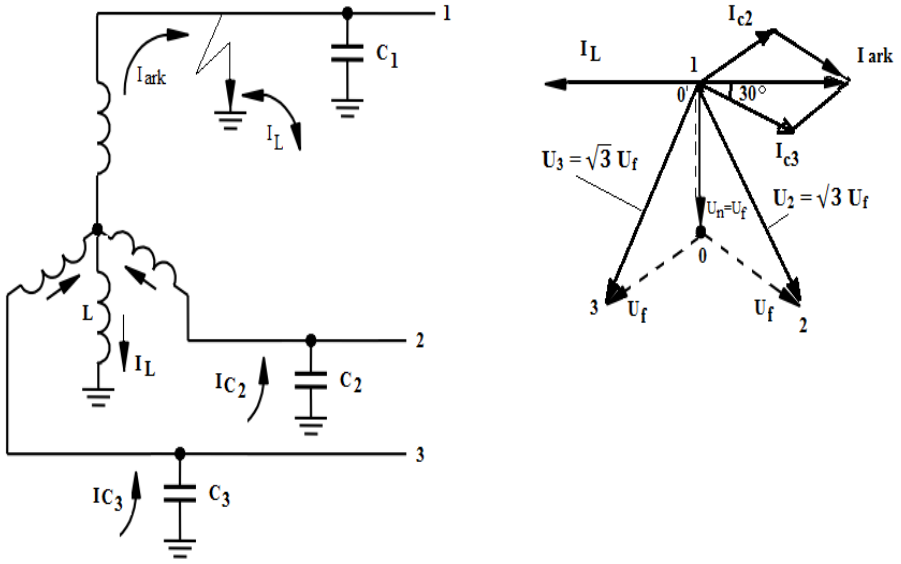
Ani yük kalkması durumunda, dönme sayısı regülatörü faaliyete geçinceye kadar, türbinin dönme sayısı da yükselebilir. Bu durum, generatör geriliminin yükselmesine neden olabilir. Dönme sayısının artması ile ayrıca uyarma dinamları ile donatılmış generatörlerde uyarma dinamosunun gerilimi yükseldiğinden, generatörün uyarması da artar. Generatörün emk'i, dönme sayısı ve uyarma ile orantılı olarak değişir.

$$E = k \cdot \Phi \cdot n \quad (4.12)$$

Buhar santrallerinde aktif yükün kalkması durumunda dönme sayısı regülatörü çok kısa zamanda faaliyete geçerek dönme sayısını ayarladığından turbo generatörlerde dönme sayısının artması sebebiyle gerilimin yükselmesi tehlikesi büyük değildir. Hidrolik santrallerde boru tesislerinin mekanik bakımdan aşırı zorlanmasına yol açmamak için dönme sayısı ayarının çok hızlı yapılması mümkün değildir. Bundan dolayı hidrolik santrallerde türbin tipine göre % 50 oranında bir artış söz konusu olur. Böylece hem gerilimde hem de frekansta aynı oranda bir artış baş gösterir.

4.4. Bir Fazın Toprakla Temasından Oluşan Aşırı Gerilimler

Bir fazın toprakla temas etmesi durumunda, toprakla temas eden fazın gerilimi sıfıra eşit olur. Nötr noktasının gerilimi ise faz gerilimine kadar yükselir. Diğer iki fazın gerilimi ise hat gerilimine eşit olur. Bu olay, Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Faz gerilimlerinin durumu (Тиняков.1982)

Eğer toprak teması arkla olmuş ise bu durumda arkta geçen akım diğer iki fazın kapasitif akımlarının toplamına eşittir.

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (4.13)$$

I_2 ve I_3 akımları için,

$$I_2 = I_3 = \sqrt{3} \cdot U_f \omega \cdot C \quad (4.14)$$

yazılabilir. Burada:

C – Faz hattının toprağa göre kapasitesidir. Bu durumda arkta geçen akım için,

$$I_{ark} = I_1 = 2 I_2 \cdot \cos 30^\circ = 2 \cdot \sqrt{3} U_f \omega \cdot C \frac{\sqrt{3}}{2} = 3 U_f \omega \cdot C \quad (4.15)$$

yazılabilir.

Arkta geçen akımı söndürmek için yani sıfıra eşit yapmak için sistemin nötr noktasını ark söndürme bobini üzerinden topraklamak mümkündür.

Arıza yerinden geçen akımın sıfır olabilmesi için $I_L = I_{ark}$ olmalıdır. I_L akımı için,

$$I_L = \frac{U_f}{\omega L} \quad (4.16)$$

yazılabilir.

Burada:

L – Ark söndürme bobininin endüktansdır.

Akımların eşitliği şartından L endüktansını bulmak mümkündür.

$I_L = I_{ark}$ ifadesinde I_L ve I_{ark} akımlarına ait ifadeler yerine yazıldığında,

$$\frac{U_f}{\omega L} = 3 U_f \omega \cdot C \quad (4.17)$$

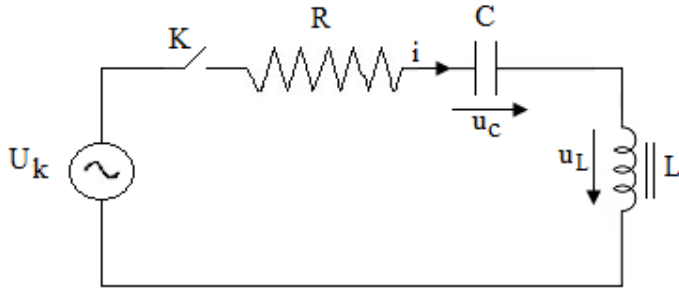
olur. Buradan da L endüktansı için,

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C} \quad (4.18)$$

yazılabilir. Bu koşul, sistemin tasarım aşamasında gerçekleştirilirse bile uygulama $I_{ark} = 0$ olmaz. Fakat küçük bir değere sahip olabilir.

4.5. Ferrerezonans Olayından Oluşan Aşırı Gerilimler

Belirli bir gerilim kaynağı üzerinden beslenen R, C ve demir çekirdekli bir L'den (nonlineer endüktanstan) oluşan devrelerde ferrerezonans olayı meydana gelir. Yıldız noktası direkt topraklı olan yada bir endüktans üzerinden topraklı olduğu durumdaki sistem, Şekil 4.7'deki gibi bir seri rezonans devresiyle temsil edilir.

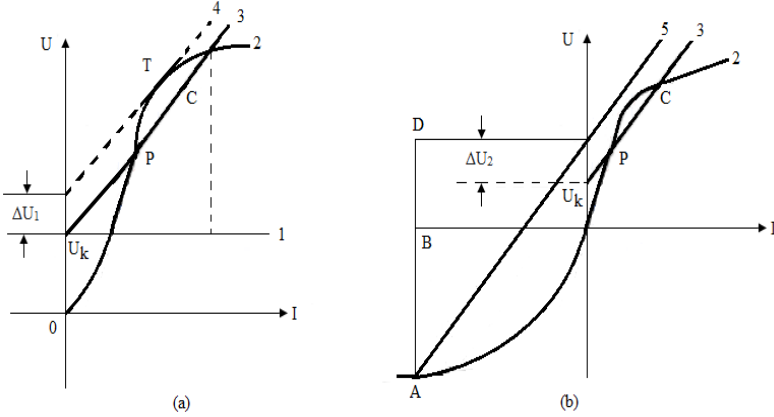


Şekil 4.7. Yıldız noktası doğrudan topraklı olduğu durum (Özkaya.1982)

Bu tür devrelerle,

- 1- Aynı kaynaktan beslenip yüksüz çalışan güç transformatörü içeren sistemlerde,
- 2- Nötr noktası direkt topraklı ve gerilim transformatörü olan sistemlerde,
- 3- Faz toprak temasına benzer ve kesiciler tarafından açılıp kapanan sistemlerde karşılaşılabılır.

Ferrezonans sistemdeki frekans ve gerilim değışimleri ile meydana gelir. Ferrezonansın oluşumu, Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Ferrezonansın oluşumu (Özkaya.1982)

Burada:

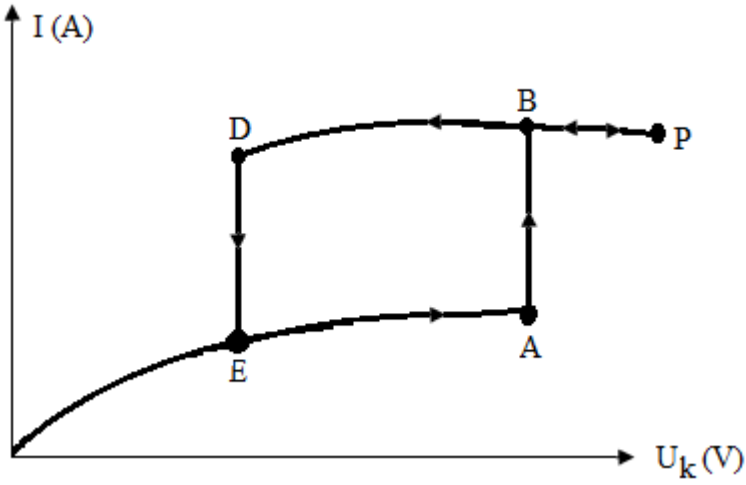
1. Kaynak gerilim karakteristiğini,
2. Demir çekirdekli sargının $U_L = f(I)$ karakteristiğini,
3. (ωC) eğimli $U_C = f(I)$ karakteristiğini gösterir.

Ç çalışma noktasında çalışırken kaynak gerilimi U_k 'da ΔU_1 gibi artış olursa, Ç çalışma noktası T teğet (kritik) noktasına kayar. Eğer artış, ΔU_2 yapılırsa bu durumda 1. bölümde bir çalışma noktası olmaz. Şekil 4.8b'de görüldüğü gibi 3. bölümde A gibi yeni bir çalışma noktasına aniden geçilir. Bu nedenle bu olaya “sıçrama olayı” da denilir. Bu durumda;

1. Akım genlik itibarıyla çok büyür.
2. Akım faz itibarıyla faz değıştirir.
3. u_L sargı gerilimi yükselir.

4. uc gerilimi çok yükselir.

Şekil 4.7'deki C, gerçek sistemde faz-toprak arası veya fazlar arası kapasiteyi gösterir. Buradan ferrerezonans olayı olunca fazlarda aşırı gerilimler ortaya çıkar. Şekil 4.7'de gösterilen devre ferrerezonansa geldiğinde, U_k : kaynak geriliminin etkin değeri, I : i akımının etkin değeri olmak üzere, $I = f(U_k)$ değişimi Şekil 4.9'teki gibi olur.



Şekil 4.9. $I = f(U_k)$ değişimi (Özkaya.1982)

Gerilim A noktasına eriştiğinde küçük bir artışa sahip olunca akım aniden büyük bir değere, B noktasına sıçrar. Gerilim artırılıp P noktasına vardıldıktan sonra gerilimi azaltacak olursak akım B'nin yerine D'den aniden E'ye düşer. Görüldüğü gibi $I = f(U_k)$ karakteristiği histerik bir özelliğe sahiptir. ABDEA çevriminin yüzeyi devrenin C kapasitesi ile büyür, R omik direnci ile küçülür. Öyle ki R yeteri kadar büyük ise B noktası A'ya doğru kayarak A noktası ile birleşir. Bu durumda sıçrama olayı olmaz ve sistem rezonanstan kurtulur.

BÖLÜM 5

AŞIRI GERİLİMLERE KARŞI KORUMA

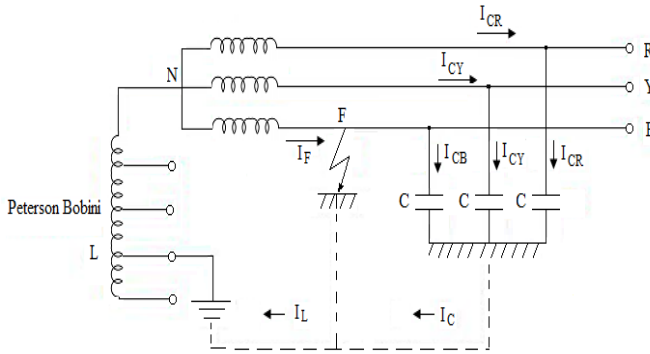
Aşırı gerilimlerin etkilerini azaltmak için kullanılan koruma yöntemleri;

- Peterson bobini,
- Ark boynuzu,
- Koruma,
- Parafudr,
- Paratoner,

şeklinde sıralanabilir.

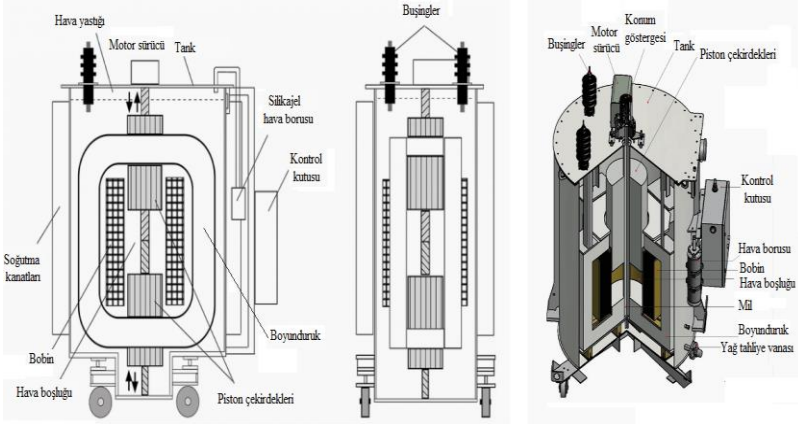
5.1. Peterson Bobini Kullanma Yöntemi

Kaynak tarafında yıldız bağlanan yüksek gerilime sahip enerji iletim sistemlerinde yıldız noktası ya doğrudan topraklanır veya yalıtılır. Topraklama; direkt, peterson bobini üzerinden, omik direnç üzerinden, lineer reaktör üzerinden ve non-lineer reaktör üzerinden olabilir. B fazında oluşan hat-toprak arızası Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. B fazında oluşan hat-toprak arızası

Ark bastırma bobini olarak da bilinen Peterson bobini, bir trafo merkezinde giden fiderler tarafından sağlanan kapasitif toprak arıza akımlarını kompanse etmek için kullanılır.



Şekil 5.2. Peterson bobini kullanma iç yapısı

Peterson bobinleri tek fazlı olup transformatörün nötr noktasını topraklamak için kullanılmaktadır. Peterson bobininin uygulamadaki kullanımına ilişkin resim Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Peterson bobininin uygulamadaki kullanım

Yıldız noktasını topraklamanın avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

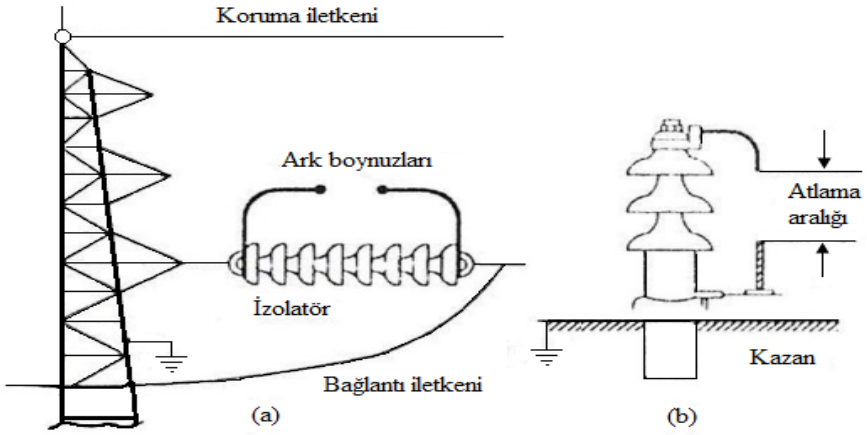
1. Nötr noktası, toprak potansiyeli seviyesinde tutulur. Faz-toprak kısa devrelerinde arızasız (sağlam) fazlarda gerilim yükselmesi önlenir.
2. Toprağa akan kaçak akımlar ile çalışan koruyucu cihazların çalışmasına olanak sağlanır.
3. Nötr noktası-toprak arası oluşan arklar önlenmiş olur.

Ancak bu faydaların yanında yıldız noktasının topraklamasının aşağıdaki dezavantajları vardır.

1. Direkt topraklama yapılması durumunda kısa devre akımları büyük değerler alır.
2. Sistemde toprak kısa devresi olur olmaz, hemen arkası sıra bu arıza giderilmesi gerekir. Arıza giderilmediği takdirde, büyük değerlere sahip kısa devre akımlarının zararlı etkileri olur.
3. Özellikle yıldız noktası, peterson bobini üzerinden topraklanırsa ferreazonansa zemin hazırlanmış olunur.

5.2. Ark Boynuzu Kullanma Yöntemi

Transformatör geçit izolatörlerinde (buşinglerde) ve izolatörlerde ark boynuzları kullanılmaktadır. Ark boynuzlarının kullanıldığı yerlere örnek Şekil 5.4'te verilmiştir.



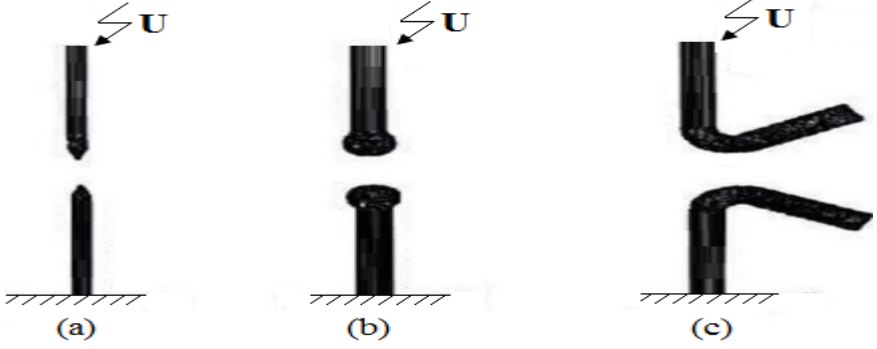
Şekil 5.4. Ark boynuzlarının kullanıldığı yerler (Akpınar.1997)

Ark boynuzları arasındaki atlama aralığı korunan elemanın dayanabileceği gerilimden biraz daha küçük bir gerilime ayar edilmelidir. Aşırı gerilim, ayar edilen gerilime erişir erişmez hemen atlama olmaz, küçük de olsa bir gecikmeyle atlama olur. Çünkü ark boynuzları arasındaki hava aniden iyonize olmaz. Ark boynuzu atlama aralıkları boynuz uç yapısına ve boynuzların biçimine bağlıdır. Ark boynuzu atlama aralıkları genel olarak Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Ark boynuzuna ait atlama aralıkları

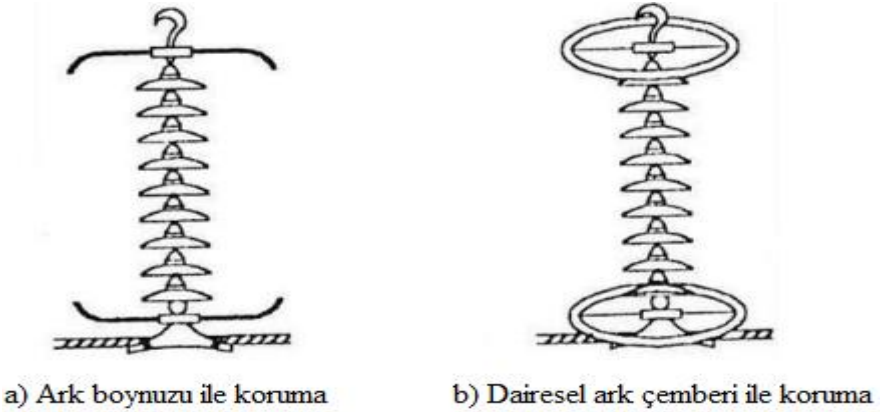
İşletme Gerilimi (kV)	Atlama Aralığı (mm)
6	40
10	50
15	115
35	200
60	400
110	600
150	850
220	1250
380	2300

Ark boynuzlarının uç yapısı sivri uçlu veya küre biçiminde olabilir. Gövdesi ise düz çubuk veya “V” biçiminde olabilir. Ark boynuzlarının uç ve gövde biçimleri Şekil 5.5’te verilmiştir.



Şekil 5.5. Ark boynuzlarının uç ve gövde biçimleri (Akpınar.1997)

İzolatörler, aşırı gerilimlere karşı ark boynuzlarıyla korunduğu gibi dairesel ark çemberleriyle de korunabilir. İzolatörlerin aşırı gerilimlere karşı korunması Şekil 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.6. İzolatörlerin aşırı gerilimlere karşı korunması (Akpınar.1997)

İzolatör boyunca gerilim dağılımını da dairesel ark çemberleri düzgülneştirdiği için korona kaybını da azaltılmış olurlar. Fakat ark

boynuzlarına göre dairesel ark çemberleri daha pahalı ve yerleştirilmesi daha zordur.

5.3. Koruma Hattı (Koruma İletkeni)

Çift enerji iletim hattı olan sistemlerde bile pahalı olması nedeniyle ikiden fazla koruma hattı kullanılmaz.

Koruma hattının görevleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

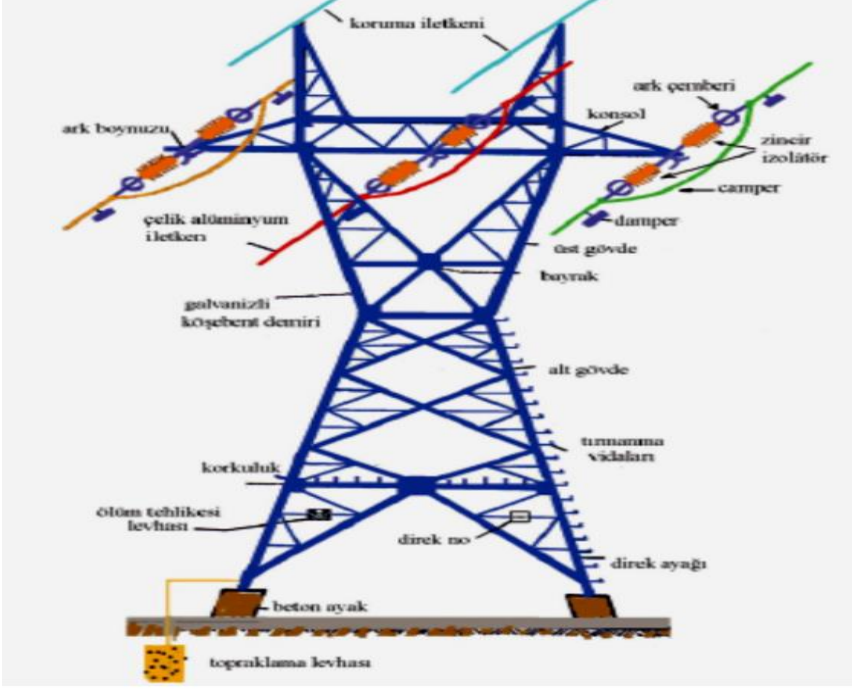
1. Yıldırım düşmesine karşı faz iletkenlerini korumak,
2. Yüklü bulutların etkisinden faz iletkenlerini korumak,
3. Enerji iletim hatlarında bulunan izolatörleri korumak,
4. Şalt sahalarında bulunan yalıtım malzemelerini “ekranlama” yapmak suretiyle koruma sağlamaktır.

Bu görevleri yaparken topraklama direnci oldukça küçük, “koruma açısı” yeterli düzeyde olması gerekir. Topraklama direncinin büyük veya kullanıldığı sistemin yalıtım düzeyinin küçük olması durumunda koruma hattı koruma yapacağı yerde zararlı duruma gelmektedir. Örnek olarak topraklama direnci 20Ω olan bir koruma hattından 10 kA’lık bir boşalma akımı akması ve hattın iç direncinin ihmal edilmesi durumunda toprak ile koruma hattı arasında,

$$U = I.R = 10 \text{ kA} \cdot 20 \Omega = 200 \text{ kV}$$

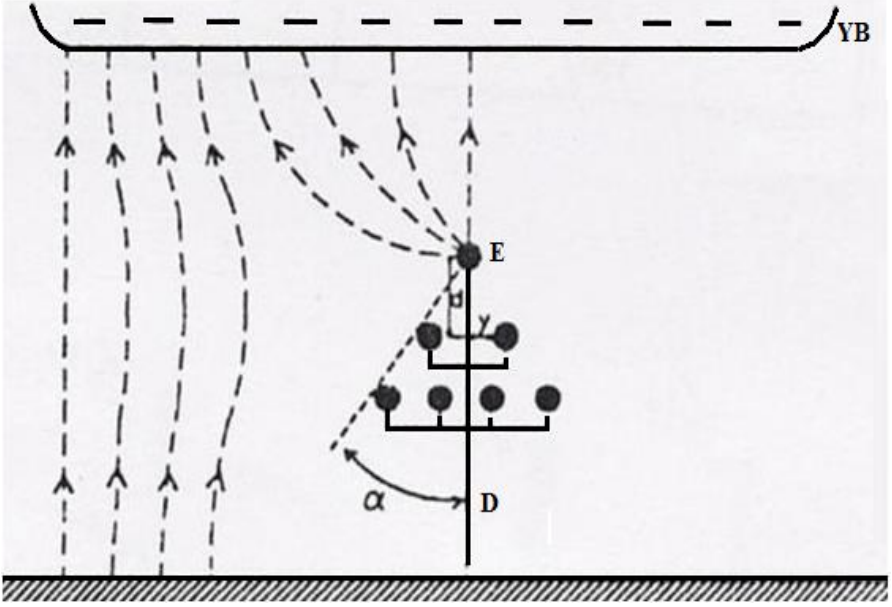
değerinde yüksek gerilim meydana gelir. Yalıtım düzeyinin bu gerilim değerinin altında olan sistemlerde söz konusu gerilim, tehlike oluşturmaktadır. Başka bir ifade ile koruma hattı koruma oluşturacağı yerde tehlike oluşturmaktadır. Dolayısıyla koruma hattı orta gerilim

sistemlerinde kullanılmaz. Yüksek gerilim elektrik direklerinde kullanılan koruma iletkeni Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Yüksek gerilim elektrik direklerinde kullanılan koruma iletkeni

Koruma açısı, koruma iletkenin faz iletkenlerini ekranlama etkisinden meydana gelir. Koruma iletkeni direk üzerine yerleştirildiği zaman $d/y \geq 1,5$ olmasında, yapılan deneyler faz iletkenlerinin iyi korunduğunu göstermiştir. Koruma iletkeninin ekranlama etkisi Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.8. Koruma iletkeninin ekranlama etkisi (Akpınar.1997)

Burada:

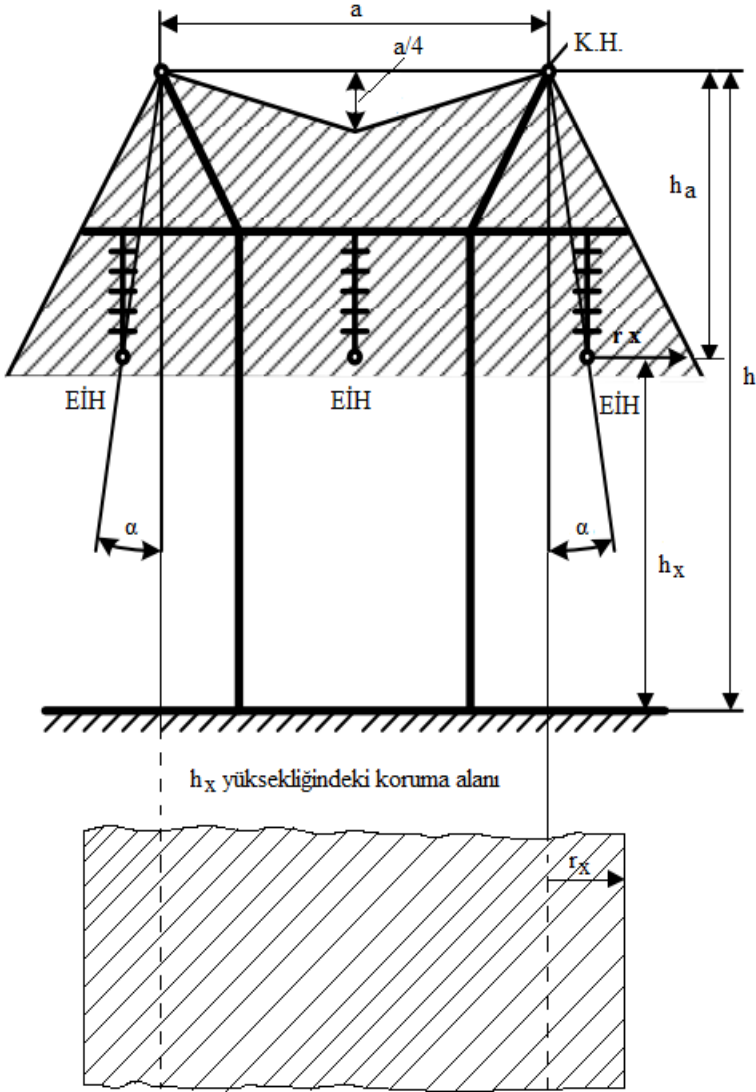
YB : Yıldırım bulutu

E : Topraklanmış iletken

D : Direk (Topraklanmış) olarak ifade edilmiştir.

$d/y = 1.5'$ için $\alpha_k = 32^\circ$ olur. Yüksek gerilimlere çıktıkça koruma açısı ve koruma iletkeninin direk üzerinde tespit edileceği yükseklik böyle ampirik bir yöntemle değil ayrıntılı tasarım bilgilerinden faydalanılarak belirlenir.

Enerji iletim hatlarının yıldırım düşmesine karşı iki koruma hatlı koruma durumu Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. İki koruma hatlı koruma durumu (Тиняков.1982 ve Дерюгина.2020)

Burada:

K. H.- Koruma hattını ifade etmektedir.

a- Koruma hatları arasındaki uzaklıktır.

h_x - korunacak objenin yüksekliğidir.

h_a – aktif yüksekliği ifade etmektedir.

$H = h_a + h_x$ olup toplam yüksekliğidir.

Enerji iletim hatlarının yıldırım düşmesine karşı iki koruma hatlı koruma durumunda koruma alanının iç sınır alanı,

$$r_x = 0,8 h \frac{h-h_x}{h+h_x} P \quad (5.1)$$

şeklinde bulunur.

Dış alan kısmı ise koruma hattı ile 1 noktası tarafından çizilen bir dairenin bir yayını temsil eder. Şekil 5.9'daki 1 noktasının yerden olan yüksekliği $h-a/4$ şeklindedir.

Denklem (5.1) ifadesinde P bir katsayıdır.

$h \leq 30$ m olduğunda $P = 1$ alınır.

$h > 30$ olduğunda $P = \frac{5,5}{\sqrt{h}}$ şeklinde hesaplanır.

Yıldırımın koruma hattını geçerek enerji iletim hattına düşmesi ihtimali,

$$\text{Ln } P\alpha = \frac{\alpha \sqrt{h_{K.H}}}{90} - 4 \quad (5.2)$$

şeklinde ifade edilir.

Koruma açısı $\alpha = 25^\circ$, koruma hattının yerden olan yüksekliği $h_{K.H} = 25$ m olduğunda $P\alpha = 0,0025$ olur. Yani 10000 yıldırım düşmesi sonucunda sadece 25 kere yıldırım koruma hattını geçerek faz hattına düşecektir. Koruma açısı $\alpha = 45^\circ$, koruma hattının yerden

olan yüksekliği $h_{K.H} = 25$ m olduğunda $P\alpha = 0,03$ olur. Yani 100 yıldırım düşmesi sonucunda sadece 3 kere yıldırım koruma hattını geçerek faz hattına düşecektir. Buradan da görüleceği üzere koruma açısının değeri arttıkça yıldırımın koruma hattını geçerek faz hattına düşmesi olasılığı artmaktadır.

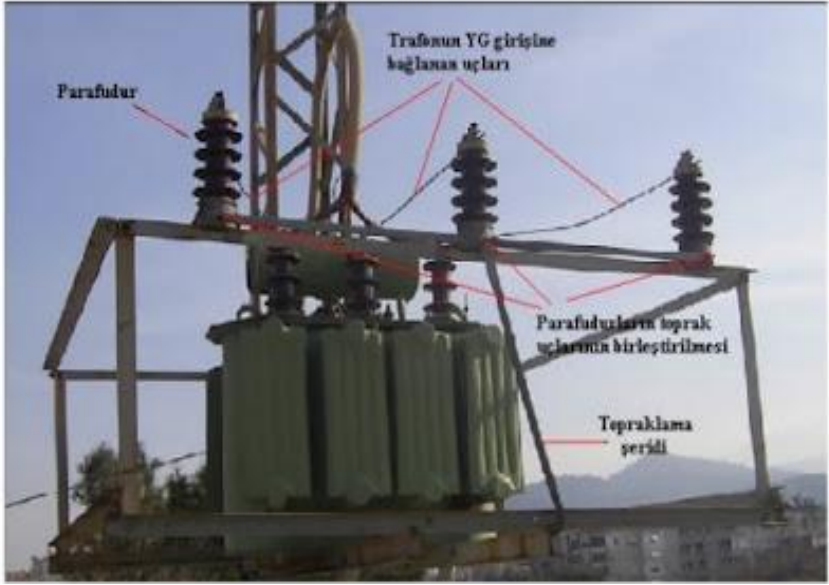
5.4. Parafudrlar

Daha önce anlatılan aşırı gerilimlere karşı koruma yöntemlerinin temel sakıncaları aşağıdaki sıralanabilir.

1. Peterson bobininin kullanımı, ferrezonans olmasına sebep olmaktadır.
2. Ark boynuzu kullanma yönteminde, arkı başlatan aşırı gerilim ortadan kalksa bile ark, işletme geriliminin etkisi ile bir müddet daha devam etmesi nedeniyle kesicilerin açma süresini etkilemektedir.
3. Koruma hatları iyi topraklanmadığı takdirde boşalma akımı aktığı müddetçe bu hatların toprağa göre potansiyel değeri çok yüksek olması nedeniyle yalıtımı tehlikeye atmaktadır.

Bu nedenle enerji iletim hatlarında oluşan aşırı gerilimi toprağa deşarj eden koruma elemanı olan parafudr adı verilen cihazdan da faydalanılmaktadır. Nominal işletme geriliminde parafudrun sisteme herhangi bir şekilde etkisi olmamaktadır. Fakat işletme geriliminin öngörülen bir gerilimi aşması ile parafudr aktif hale gelmektedir.

Bu nedenle, sistem üzerinde bulunan aşırı gerilimi sınırlayan bir eleman olarak görev yapmaktadır. Oluşan aşırı gerilimin ortadan kalkması durumunda ilk durumdaki çalışma konumuna dönmektedir. Üç fazlı olan sistemler için her faza bir parafudr bırakılır. Parafudrların direk tipi trafo postasında bağlantısını gösteren resim Şekil 5.10'da verilmiştir.

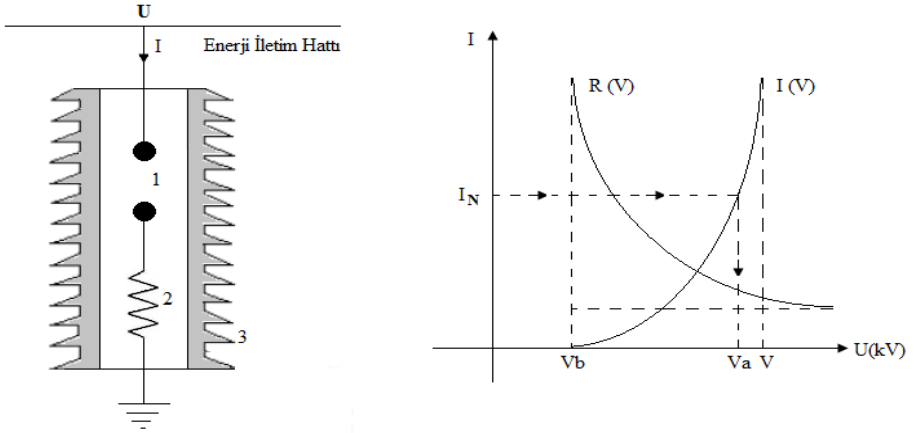


Şekil 5.10. Parafudrların direk tipi trafo postasında bağlantısı

Parafudrlar, değişken dirençli ve metal oksit parafudrlar olmak üzere ikiye ayrılır.

5.4.1 Değişken Dirençli Parafudrlar

Değişken dirençli parafudr'un yapısı ve karakteristikleri Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.11. Değişken dirençli parafudr'un yapısı ve karakteristikleri (Akpınar.1997)

Burada;

- 1- Küresel elektrodlu eklatör,
- 2- Değişken direnç,
- 3- Yalıtkan gövde,

I_N - Anma boşalma akımı,

V_a - Artık gerilim

V_b - Çalışmaya başlama gerilimi olmaktadır.

Şekil 5.11'ten görüldüğü gibi değişken dirençli parafudrlar hava aralıklı bir eklatör ve bununla seri bağlanan değişken bir dirençten (değeri gerilime bağlı dirençten) oluşmaktadır.

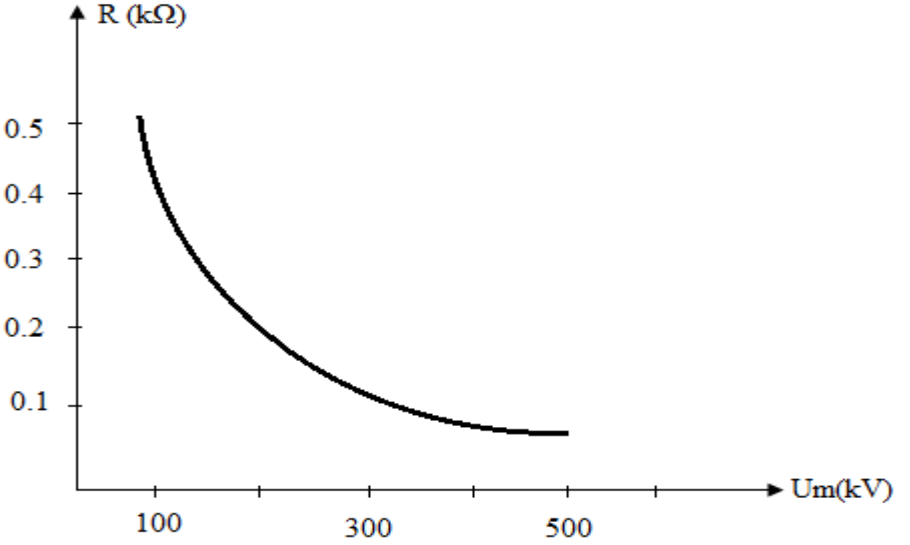
Bunlar yalıtkan bir gövde (porselen, epoksi reçine, vb.) içerisinde bulunmaktadır. Parafudrun değişken direnç ve dirençleri ile seri olarak bağlı bulunan belirli hava aralıklı elektrodla seri eklatör denir. Eklatör normal işletme geriliminde ($U = U_{i\text{ş}} < V_b$) çalışmaz, yani hava aralığında bir ark oluşmaz. Ancak aşırı gerilim $U \geq V_b$ olur

olmaz ark oluşmaya başlar. Dolayısıyla direncin uçları arasında bir gerilim düşümü olur. Direnç değeri gerilime bağlı olup U büyüdükçe direnç değeri düşer. Ark akımı, parafudrun anma ark akımından büyük olursa parafudr kullanılmaz hale gelir.

Eklatörden beklenen özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Çalışma başlama gerilimi dediğimiz bir gerilime (V_b 'ye) kadar ark oluşturmamak, böylece sistemin yalıtım özelliğini korumak,
2. Aşırı gerilim V_b sınır değerini aşar aşmaz, gecikmesiz olarak çalışıp arkı başlatmak,
3. Aşırı gerilim ortadan kalktıktan sonra işletme geriliminin etkisi ile devam etme eğiliminde olan ark akımını sıfırdan geçerken kesmektir.

Değişken direnç olarak silicon - carbide diskleri kullanılır. Bu diskler üst üste konulup bir paket haline getirilerek yerleştirilir. Böyle bir elemana ilişkin direnç - gerilim karakteristiği Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Silicon-carbide'in direnç-gerilim karakteristiği (Akpınar.1997)

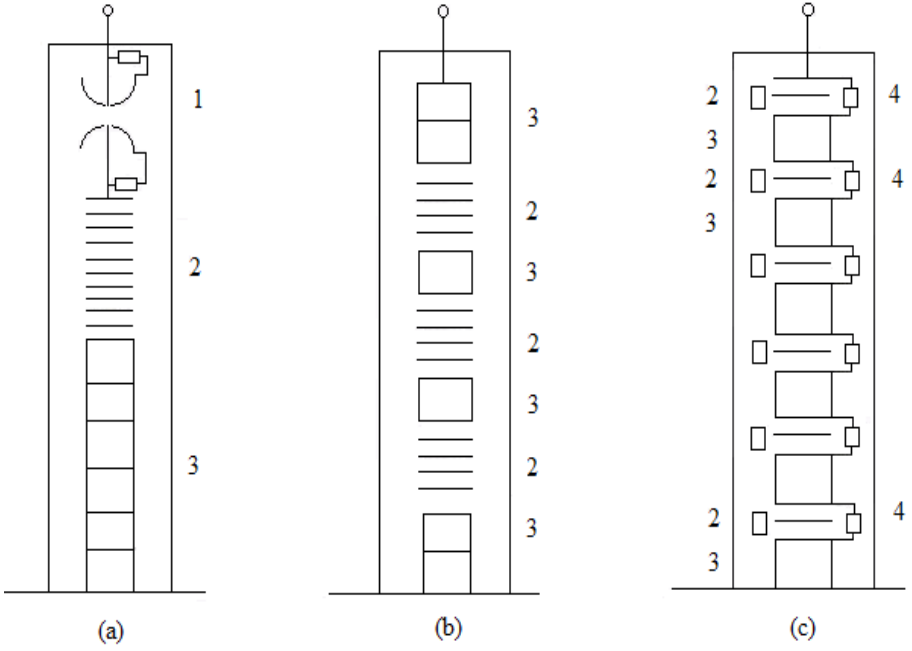
Burada:

U_m - Uygulanan gerilimin tepe değeridir.

Bir parafudrda;

1. İşletme gerilimi altında iken seri eklatörler boyunca gerilim dağılımı düzgün olmalıdır.
2. Darbe geriliminde çalışmaya başlama gerilimi (V_b), darbe geriliminin şekline ve dış etkilere bağımlı olmamalıdır.

Bunları sağlamak için parafudrlar Şekil 5.13'te gösterilen şekillerden birine göre imal edilmelidirler.

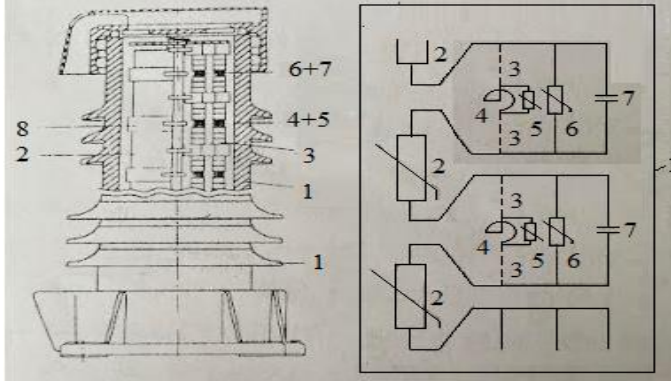


Şekil 5.13. Değişken dirençli parafudrlar (Akpınar.1997)

Burada:

- 1- Ön Eklatör,
- 2- Seri eklatör,
- 3- Değişken dirençler,
- 4- Kumanda dirençleri'dir.

Modern parafudrlarda seri eklatörlerle seri bağlı ark söndürme bobinleri ile bu eklatörlere paralel bağlı direnç ve kondansatörlerde (gerilim bastırıcı) kullanılır. Şekil 5.14'te böyle parafudr ile bunun devre şeması verilmiştir.



Şekil 5.14. Söndürme bobinli, gerilim bastırıcı bir parafudr ile bunun devre şeması (Akpınar.1997)

Burada:

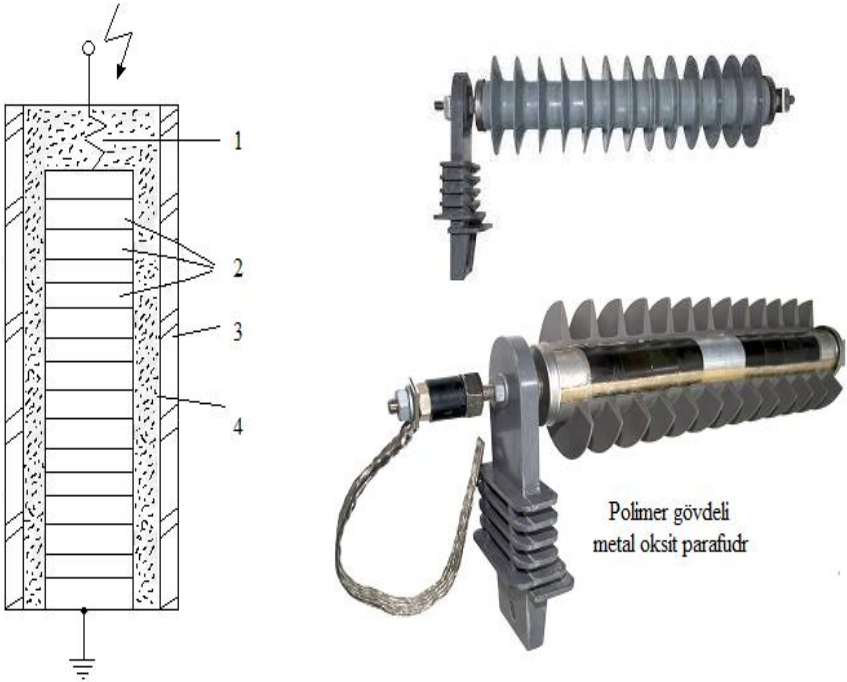
- 1- Yalıtkan (Porselen izolatör),
- 2- Değişken direnç,
- 3- Seri eklatörler,
- 4+5 – Ark söndürme devresi,
- 6+7 – Gerilim bastırma devresi,
- 8 – Yalıtkan ayırıcılardır.

Şekil 5.14'te verilen parafudr 72 kV anma geriliminden 156 kV anma gerilimine kadar kullanılmakta olup 72 kV'ta çalışmaya başlama gerilimi $V_b = 108$ kV, 156 kV'ta ise $V_b = 234$ kV'tur. Daha yüksek anma gerilimine sahip olanların baş kısmında korona kayıplarını azaltıcı, gerilim dağılımını düzenleyici koruma halkaları bulunur. Şekil 5.14'te 5 nolu direnç, ard akımlarına büyük direnç göstererek bunların 4 nolu bobinden geçmesini sağlar. Aşırı gerilimde bu direnç, akıma ikinci bir yol temini için kullanılır. İzleme veya ard akımı I_a ile gösterilir. Darbe boşalma akımının geçişini izleyen ve şebeke gerilimi altında parafudrdan geçen akıma izleme veya ard akımı adı verilir.

İzleme veya ard akımı, tepe değeri olarak verilir. 4 nolu bobinin oluşturduğu alan seri eklatörlerdeki arkı söndürerek ard akımının kısa sürede kesilmesini sağlar. Gerilim bastırıcı devre ise aşırı gerilimi kısmen söndürmeye (bastırmaya) yarar.

5.4.2. Metal Oksit Parafudrlar

Metal oksit parafudrlarda, normal işletme gerilimlerinde içlerinden küçük de olsa bir akım akması nedeniyle bir enerji kaybı ortaya çıkar. Bu kayıp enerji, direnç elemanlarının da ısınmasına yol açar. Metal oksit parafudrların yapısı ilke olarak Şekil 5.15'teki gibidir.



Şekil 5.15. Metal oksit parafudrlar (Akpınar.1997)

Burada;

- 1- Sıkıştırma yayı,
- 2- Metal oksit direnç elemanları,
- 3- Gövde,
- 4- Basınçlı gazdır.

Şekil 5.15'den görüleceği gibi bunların eklatörleri yoktur. Dolayısıyla bunlarda eklatör problemleri bulunmaz. Ayrıca kirlenmeden de etkilenmedikleri için kirli ortamlarda kullanılırlar. Direnç elemanı olarak metal oksit kullanılır. Bunun içeriğinde Çinko Oksit (ZnO), Bimut Oksit (Bi_2O_2), Mangan Oksit (MnO_2), Antimon Oksit (Sb_2O_3) ve benzeri gibi metal oksitler bulunur.

Bunlar eklatörlülere göre;

1. Daha küçük koruma düzeylerinde çalışabilirler,
2. Dik cepheli gerilim darbelerine karşı koruması daha iyidir,
3. İç aşırı gerilimlerde de koruma görevi yapabilmektedirler.

Parafudrlardan beklenen özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Çalışmaya başlama gerilimi V_b , aşırı gerilimin biçimine ve türüne bağımlı olmaması gerekir,
2. V_b ; yağmur, sis, kir gibi dış etkilere bağımlı olmamalıdır,
3. I_N anma boşalma akımı akarken oluşan artık gerilim müsaade edilen sınırı aşmamalıdır,
4. Söndürme gerilimi (Anma Gerilimi: Ard akımının kesildiği anda parafudr uçları arasındaki en büyük aşırı gerilim) en kötü dış etkiler altında dahi işletme geriliminin altında olmamalıdır,

5. Ardışık gelen aşırı gerilimlerde beklemeli çalışmalıdır,
6. Enerji sistemini (şebekeyi) etkilememelidir.

Parafudrlar, yukarıda belirtilen özellikler dikkate alınarak seçildikten sonra yerleştirilirken, yani donanımı yapılırken dikkat edilmesi gereken önemli hususlar vardır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Topraklama direnci iyi yapılmalı ve küçük değerli olmalıdır (1 Ω 'un altında),
2. Topraklama direnci zaman zaman ölçülüp kontrol edilmelidir. Ölçüm sonucunda topraklama direncinde artma varsa, topraklayıcının etrafına tuz ve kömür tozu dökülerek toprak geçiş direnci küçültülmelidir,
3. Topraklama için yapılacak bağlantı en kısa yoldan olmalı ki topraklama direnci artmasın,
4. Koruyacağı aygıtların yakınına konulmalıdır.

5.5. Paratonerler

Paratonerler, elektrik güç sistemlerindeki aşırı gerilimlere karşı korumada kullanılan cihazlardır. Paratonerler, aktif paratonerler ve pasif paratonerler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

5.5.1. Aktif Paratonerler

Aktif paratonerlerin kullanma amacı, yıldırımını üzerine çekerek daha güvenli bir koruma sağlamaktır. Koruma tekniğinde, havanın iletken hale getirilerek yıldırımın paratonerin sivri ucundan yakalanması

amaçlanmaktadır. Farklı tipteki aktif paratonerler, Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.16. Aktif paratoner

Aktif paratonerler; radyoaktif paratonerler, piezoelektrik paratonerler ve elektrostatik aktif paratonerler olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

5.5.1.1. Radyoaktif Paratonerler

Radyoaktif paratonerler, radyoaktif elementler kullanılarak korunması gereken yerde havayı iyonize etmek suretiyle, yıldırımın yıldırım çekme ucuna çekip, buradan toprağa verme şeklinde çalışmaktadır. Radyoaktif paratonerlerin gövdesinin içinde küresel kurşun bir hazne yer almaktadır. Bu küresel kurşun haznenin üzerinde ışımanın

engellenmesini önlemek için delikler vardır. Farklı radyoaktif paratonerler tipleri Şekil 5.17’de gösterilmiştir.



Şekil 5.17. Farklı radyoaktif paratonerler

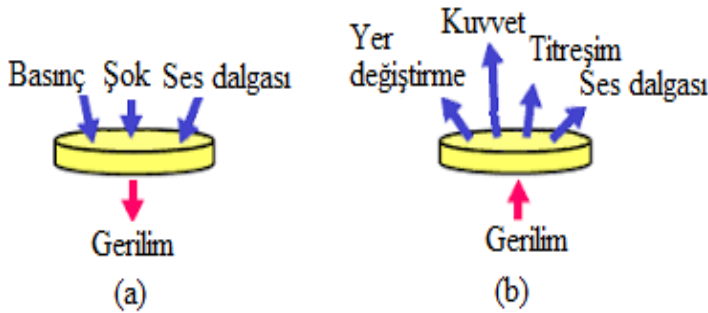
Radyoaktif element kurşun hazne içine konulur. Işıma, kurşundan geçemediğinden dolayı üst kısımlarda bulunan deliklerden havaya doğru yönelecektir. Bunun sonucunda havayı iyonize edecektir. Oluşan (+) iyonlar belli bir çap içindeki yıldırım kendisine doğru çekerek koruma sağlanmış olur. Koruma çapı, kullanılan radyoaktif elementin miktarına bağlı olarak değişmektedir. Radyoaktif madde çok fazla artırıldığı halde koruma çapında doğadaki bazı sınırlamadan dolayı artış olmadığı belirlendiği için, üretimlerinde en fazla koruma çapı 200 metre olacak şekilde planlanmaktadır. Radyoaktif paratonerlerde kullanılan radyoaktif element alfa, beta ve gama ışınması yapmaktadır. Yıldırım yakalama ömrü 5 ile 10 yıl arasında olan radyoaktif paratonerler ışınlarının insan sağlığına olan zararları ise çok uzun yıllar boyunca sürebilir.

Radyoaktif paratonerlerin montajının yapılması ve periyodik bakımlarının yapılması sırasında, yanına yaklaşırken bile çok dikkatli

olmak ve çıplak el ile kesinlikle temas edilmemesi, mümkün ise özel eldiven ve giysilerle yaklaşılması gerekmektedir. Radyoaktif paratonerin içindeki radyoaktif elementin tutulduğu kurşun kılıfın yıldırım boşalması anındaki yüksek sıcaklık nedeniyle erimesi sonucunda oluşabilecek tehlike son derece ürkütücüdür. Serbest koruyucu kılıfsız kalan radyoaktif element küresel bir şekilde ışınlar yayar ve radyoaktif paratonerin yaklaşık koruma çapı kadar olan bölgede radyasyon değeri istenmeyen biçimde artar. Radyoaktif paratonerlerin pozitif yüklü bulutlardan oluşan yıldırımlara karşı herhangi bir koruması yoktur. Sadece negatif yüklü bulutlardan oluşan yıldırımlara karşı koruma sağlarlar. Bilindiği üzere toplam yıldırım boşalmasının % 70 ile % 90'ı negatif kubiyetlidir. Geri kalan % 10 ile % 30'luk kısmı ise pozitif kubiyetlidir.

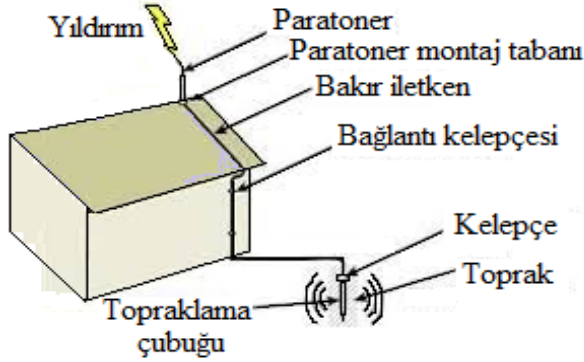
5.5.1.2. Piezoelektrik Paratonerler

Basınca maruz kaldığında yüksek gerilim üreten elementlere piezoelektrik elementler denir. Aynı zamanda piezoelektrik özellik, mekanik bir enerjiyi elektrik enerjisine (Şekil 5.18 a) veya elektrik enerjisini mekanik enerjiye (Şekil 5.18 b) çevirebilmektedir.



Şekil 5.18. Piezoelektrik malzemede enerji dönüşümü

Piezoelektrik elementin bu özelliği paratoner üreticileri tarafından kullanılmış ve piezoelektrik prensibi ile çalışan piezoelektrik paratonerler üretilmişlerdir. Sembolik olarak piezoelektrik paratonerin bağlantı şeması Şekil 5.19’da gösterilmiştir.



Şekil 5.19. Piezoelektrik paratonerin bağlantı şeması

Rüzgar etkisi ile salınım yapan paratonerin gövdesi, içerisindeki piezoelektrik kristallerini basınca maruz bırakıp yüksek gerilim darbeleri oluşmaktadır. Oluşan darbeler, paratonere ait yakalama ucu üzerinde bulunan ark boynuzlarına gönderilir. Daha sonra burada ark etkisiyle havayı iyonize eder. Piezoelektrik paratonerlerin çalışabilmesi için salınım yapması gerekmektedir. Bu salınım için rüzgarın gerekli olması, piezoelektrik paratonerin en büyük dezavantajıdır.

5.5.1.3. Elektrostatik Paratonerler

Elektrostatik paratonerlerin çalışma prensibi havanın o andaki yüklerine göre elektrik alan şiddetinin artırılmasına dayanmaktadır.

Bundan dolayı (-) veya (+) yıldırım çeşitlerine karşı koruma sağlamaktadır.

Bu paratonerlerin görevi, yıldırım toprakla birleşmeden önce yıldırımın yakalayarak boşalmayı güvenli bir biçimde toprağa aktarmaktır. Elektrostatik paratoner Şekil 5.20’de gösterilmiştir.



Şekil 5.20. Elektrostatik paratoner

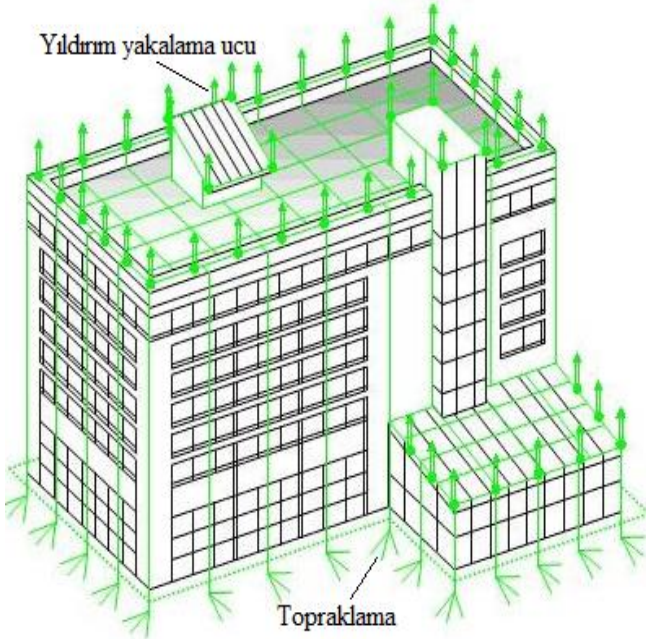
Bu nedenle, elektrostatik paratonerlerde yakalama hızı önem kazanmaktadır. Elektrostatik paratonerler, havada meydana getirdiği alan aracılığıyla yıldırıma iletken bir yol hazırlayarak toprağa veren havayı iyonize etmedikleri için gereksiz boşalmalara neden olmaz. Uzunluğu 2 metre olan ve çelik bir üniteden oluşan paratonerler özel bir bakım gerektirmez. Elektrostatik paratonerler 200 metre koruma çaplı olarak tasarlanmaktadır.

5.5.2. Pasif Paratonerler

Pasif Paratonerler, Faraday kafesi ve Franklin çubuğu olmak üzere ikiye ayrılır.

5.5.2.1. Faraday Kafesi

Faraday'ın yaptığı çalışmalar sonucunda iletken bir kafes içinde elektrik alanın olmadığı belirlenmiştir. Bu bilgiye dayanarak Melsens tarafından “Faraday Kafesi” geliştirilmiştir. Melsens, yıldırımdan korunması istenilen yapı, bakır iletkenlerle yatay ve dikey olarak kafes içine alınmakta ve çatıda belirli aralıklarla sivri uçlar çıkarılıp, tabanda da iletkenlerin çok noktada topraklama oluşturularak koruma sağlanmaktadır. Bu durumda, yapının her tarafı eş potansiyel haline gelmesi sağlanacaktır. Bu durumda, yapı üzerine düşecek bir yıldırım yapıya zarar vermeden bakır kafes üzerinden toprağa akması sağlanır. Yıldırıma karşı koruma yöntemi olan Faraday kafesine ilişkin görsel, Şekil 5.21’de verilmiştir.

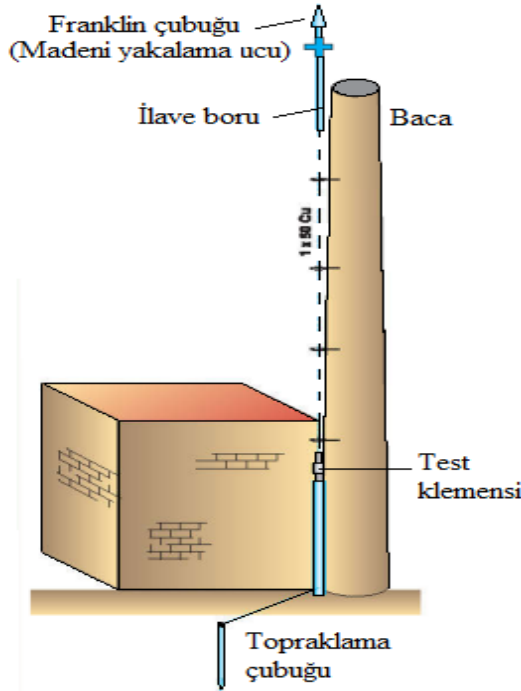


Şekil 5.21. Faraday kafesi ile yıldırımdan koruma

Faraday kafesinin sağladığı koruma, bakır iletkenlerin oluşturduğu gözlerin boyutlarına bağlıdır. Gözlerin boyutları küçüldükçe koruma artmaktadır. Faraday kafesi için ilk kurulum maliyeti fazladır. Bu kafesin uygulanmasında doğru yerin seçilmesi gerekir. Bakır kafesin herhangi bir sebeple oksitlenmesi durumunda ağır bakım maliyetleri gerekir. Tüm bu olumsuzluklar, faraday kafesi ile koruma tekniğinin uygulamasının çok yaygın olmasını engellemektedir.

5.5.2.2. Franklin Çubuğu

Bilinen en eski yıldırımdan korunma tekniği olan Franklin çubuğu ile koruma tekniğinde, yıldırımdan koruma yüksek noktalara sivri uçlu metallerin konulup toprak bağlantısının yapılmasıyla sağlanmaktadır. Genellikle camilerin minareleri, kule ve baca gibi yapıların yıldırıma karşı korunması için kullanılan bir koruma tekniğidir. Franklin çubuğu konusunda ilk çalışmalar, 1749 yılında Franklin tarafından yapılmıştır. Korunması gereken yapının üzerine sivri uçlu bir demir çubuk konularak iletkenlerle toprağa bağlantısının sağlanmasıyla paratoner sistemi kurulmuştur. Franklin çubuğu bağlantı şeması Şekil 5.22’de verilmiştir.

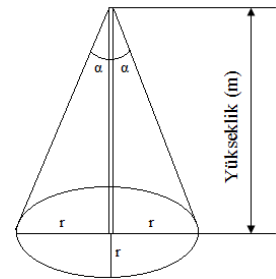


Şekil 5.22. Franklin çubuğu bağlantı şeması

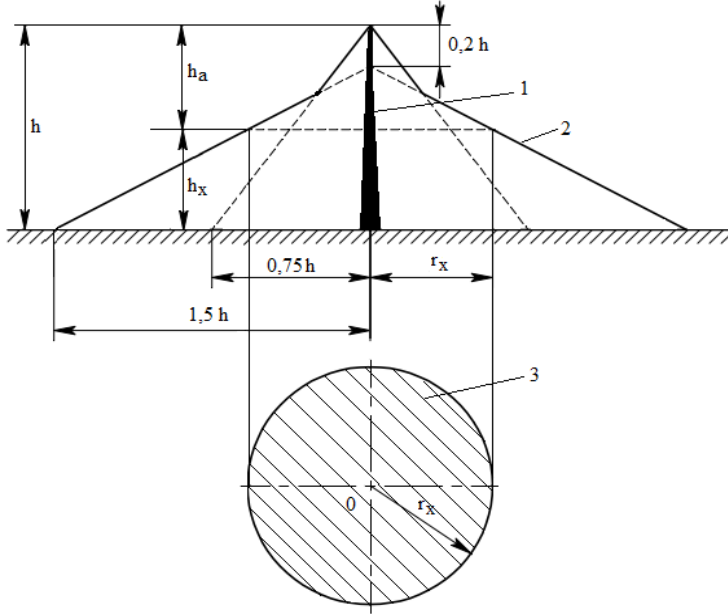
Bu koruma tekniği ile yıldırımdan korunma Türk Standartları Enstitüsü (TSE) EN 62305 standardında gerekli tanımlamaları yapılmıştır. Koruma düzeylerine göre Franklin çubuğu uygulama kriteri, Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Koruma düzeylerine göre Franklin çubuğu uygulama kriteri

Koruma Düzeyi	Franklin Çubuğu	Yükseklik (m)			
		20	30	45	60
I	α açıları	25	-	-	-
II		35	25	-	-
III		45	35	25	-
IV		55	45	35	25



Çubuk şekilli tek bir paratonerin koruma alanı Şekil 5.23'te gösterilmiştir.



Şekil 5.23. Çubuk şekilli tek bir paratonerin koruma alanı (Тиняков.1982)

Burada:

- 1- Çubuk şeklindeki paratonerdir,
- 2- Koruma alanının dış sınırını ifade etmektedir,
- 3- h_x yüksekliğindeki koruma alanının kesitidir.

h_x – Korunması gereken yapının boyudur,

h_a – Çubuk şeklindeki paratonerin boyudur,

r_x – Çubuk şeklindeki paratonerin koruma alanının metre cinsinden yarıçapıdır,

h – Toplam yüksekliktir.

h için,

$$h = h_x + h_a \quad (5.3)$$

yazılabilir.

r_x yarıçapı ise aşağıdaki amprik ifadeden yararlanarak;

$$r_x = 1,6 h \frac{h-h_x}{h+h_x} P \quad (5.4)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Burada:

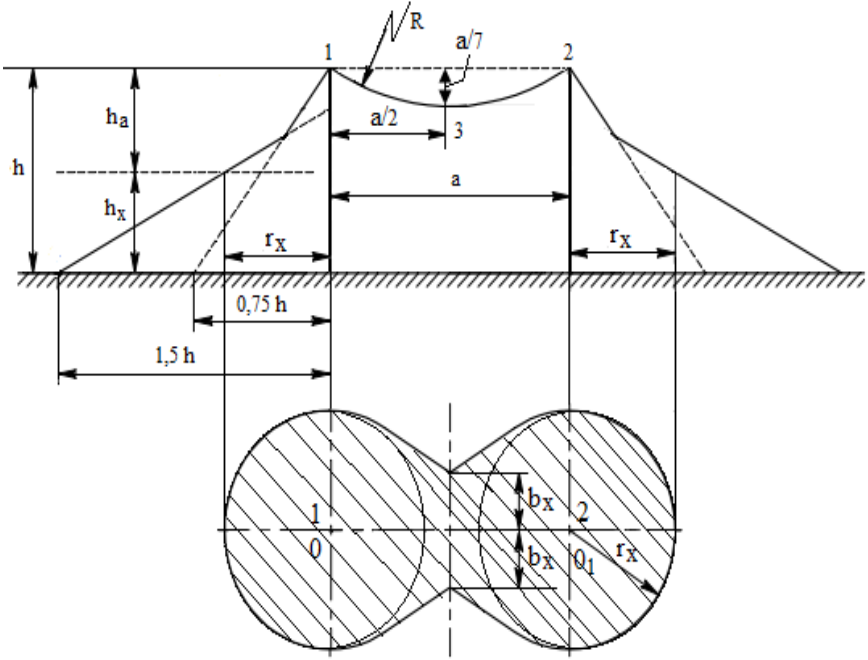
P – katsayıdır.

P'nin değeri h'a bağlı olarak hesaplanır. Bu durumda $h \leq 30$ m olduğunda $P = 1$ alınır. $h > 30$ m olduğunda ise P,

$$P = \frac{5,5}{\sqrt{h}} \quad (5.5)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Yıldırımdan korunması gereken yapı (obje) koruma alanı içinde kalacak olursa, bu durumda paratoner yapıyı yıldırıma karşı güvenli bir şekilde korumuş olur. Eğer yapılan hesaplarda bir çubuk paratonerin koruma alanı yeterli değilse, bu durumda iki çubuklu paratonerden yararlanmak mümkündür. Çubuk şekilli iki paratonerin koruma alanı Şekil 5.24'te gösterilmiştir.



Şekil 5.24. Çubuk şekilli iki paratonerin koruma alanı (Тиняков.1982)

Çubuk şekilli iki paratonerin koruma alanının dış sınırı tek bir paratonerde olduğu gibidir. İki paratoner arasındaki iç kısım ise 1, 2 ve 3 noktalarından geçen R yarıçaplı bir dairenin parçası olan eyer şeklindedir. 3 noktasının yerden olan yüksekliği; $h-a/7$ şeklindedir. h_x yüksekliğindeki $2 b_x$ en az genişliği ise,

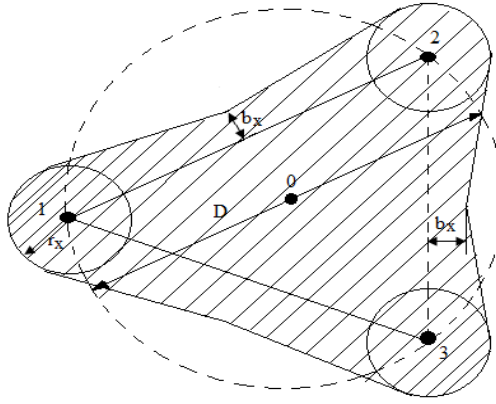
$$b_x = 4 r_x \frac{7ha-a}{14ha+a} \quad (5.6)$$

ifadesinden hesaplanır.

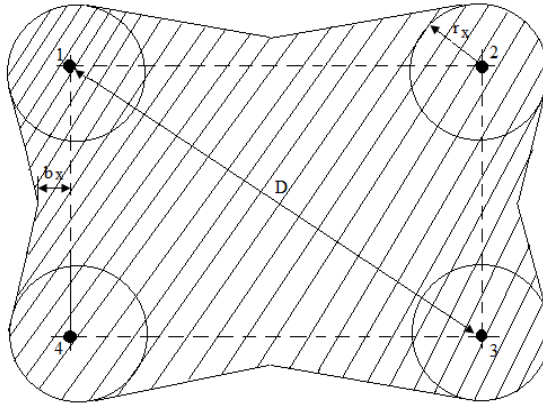
Burada:

a- paratonerler arasındaki uzaklıktır.

Çubuk şekilli üç paratonerin koruma alanı Şekil 5.25'te, dört paratonerin koruma alanı ise Şekil 5.26'da gösterilmiştir.



Şekil 5.25. Üç paratonerin koruma alanı (Тиняков.1982 ve Дерюгина.2020)



Şekil 5.26. Dört paratonerin koruma alanı (Тиняков.1982 ve Дерюгина.2020)

Burada:

D – çubuk şekilli üç paratonerin montaj noktalarından çizilen bir dairenin çapını veya üstlerinde paratoner bulunan bir dikdörtgenin büyük bir köşegenini ifade etmektedir. $h \leq 30$ m olduğunda $D \leq 8h_a$, $h > 30$ m olduğunda ise $D \leq 8h_a$. P şartı sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abdurrahmanov, M. (2006). *Elektrik Şebekelerin Mühafize Texnikası*”, Bakı.
- Akpınar, A. (1997). *Yüksek Gerilim Tekniğinin Temelleri*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi, Trabzon.
- Al-Anbarri, K., Ramanujam, R., Rao, CH.S., Kuppusamy, K., Effect of Circuit Configurad On on Chaotic Ferroresonance in Power in a Power Transformer, *Electric Power Components and Systems*, 30:1015-1031, 2002.
- Çakır, H. (1989). *Enerji İletimi (Elektrik Hesaplar)*”, Birsen yayımevi, İstanbul.
- Michał, B. , Maciej, C., Yevhen, K., and Yuriy K. (2021). Main aspects influencing the evaluation of atmospheric overvoltages in high-voltage Networks, *Bulletin Of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, Vol. 69(1), 1-8. doi: 10.24425/bpasts.2021.135838
- Naidu, M.S. and Kamaraju, V. (2009). *High Voltage Engineering*, Tata McGraw-Hill, 4th Edition, 2009.
- Nayır, A. (2011). Research And Protection of Energy Transmission Lines From The Ferroresonance Overvoltages, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, Sigma 29, 138-147.
- Özcan, A.T., (2005). *Dağıtım Şebekelerinde Yıldırım Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma*, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Malatya.
- Özkaya, M. (1988) “Yüksek Gerilim Tekniği”, Cilt 2, İstanbul 1988, İstanbul Teknik Üniversite Matbaası Gümüşsuyu.
- Özkaya, M. (1996). *Yüksek Gerilim Tekniği*, Cilt 1, Birsen Yayımevi, İstanbul.
- Snodgrass, J., & Xie, L. (2020). Overvoltage analysis and protection of lightning arresters in distribution systems with distributed generation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 123, 106209.
- Тиняков, Н. А. , степанчук, К. Ф. (1982). *Техника высоких напряжений*, Минск.
- Титков, В.В. *Перенапряжения и молниезащита: учебное пособие длявузов / В.В. титков, ф.х. ХалилОВ. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2011. – 221 с.*

Далгинов, А. И. (1962). Техника Высоких Напряжений, Москва - Ленинград.

Дерюгина, Е. А. and Пономаренко, Е. Г. (2020). Перенапряжения В
Электроэнергетических Системах, Минск.

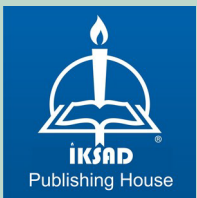
Под Общей Редакцией д. В. Разебига, (1964). Техника Высоких Напряжений,
Москва Ленинград, Издательство “Энергия”.

Под Общей Редакцией В. П. Ларионова, (1986). Техника высоких
напряжений”, Москва Энергatomиздат.

https://www.google.com/search?q=Petersen+Coils+circuit&rlz=1C1CHZN_trTR969TR969&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwid8Zmopf36AhXwXvEDHbTHAewQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1920&bih=969&dpr=1#imgrc=cRgJ42i_BcsUjM&imgdii=t70pxOfoRJ08DM

<https://circuitglobe.com/peterson-coil-grounding.html>

<https://slideplayer.biz.tr/slide/12189878/>



ISBN: 978-625-6380-38-7